

Международный союз электросвязи

**МСЭ-R**  
Сектор радиосвязи МСЭ

**Отчет МСЭ-R SM.2391-0**  
(06/2016)

**Влияние ветряных турбин на  
стационарные радиопеленгаторы**

**Серия SM**  
**Управление использованием спектра**



Международный  
союз  
электросвязи

## Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

## Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Приложении 1 к Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

### Серии Отчетов МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу <http://www.itu.int/publ/R-REP/en>)

Серия	Название
<b>BO</b>	Спутниковое радиовещание
<b>BR</b>	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
<b>BS</b>	Радиовещательная служба (звуковая)
<b>BT</b>	Радиовещательная служба (телевизионная)
<b>F</b>	Фиксированная служба
<b>M</b>	Подвижная служба, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
<b>P</b>	Распространение радиоволн
<b>RA</b>	Радиоастрономия
<b>RS</b>	Системы дистанционного зондирования
<b>S</b>	Фиксированная спутниковая служба
<b>SA</b>	Космические применения и метеорология
<b>SF</b>	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
<b>SM</b>	<b>Управление использованием спектра</b>

*Примечание.* – Настоящий Отчет МСЭ-R утвержден на английском языке исследовательской комиссией в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация  
Женева, 2018 г.

© ITU 2018

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

## ОТЧЕТ МСЭ-R SM.2391-0

**Влияние ветряных турбин на стационарные радиопеленгаторы**

(2016)

**Резюме Отчета**

Несмотря на содержащееся в Справочнике по контролю за использованием спектра МСЭ требование о необходимости обеспечения минимального безопасного расстояния между радиопеленгаторами и ветряными электростанциями в пять километров, никакие отдельные исследования фактического влияния ветряных турбин на стационарные радиопеленгаторы на различных безопасных расстояниях до сих пор не проводились.

В Приложении 1 к настоящему Отчету приводится одно исследование на эту тему, относящееся к влиянию ветропарков на радиопеленгаторы, работающие на разных расстояниях и разных частотах.

**Приложение 1****Пример исследования влияния ветряных турбин на стационарные радиопеленгаторы, выполненного в Германии****Резюме Приложения 1**

В проекте нового регионального плана предлагается назначить приоритетную область развития ветроэнергетики вокруг станции радиоконтроля Федерального сетевого агентства Германии в Рёрте.

Проведенное исследование показало, что ветряные электростанции, расположенные вблизи стационарных радиопеленгаторов, создают значительные помехи. Полученные результаты свидетельствуют о том, что даже на расстоянии 4,6 км ветряные электростанции вызывают неприемлемые отклонения пеленга и недопустимые уровни помех.

Конкретные помехи значительно варьируются в зависимости от расстояния до ветряной электростанции и ее местоположения, а также от длины волны. В случае длинноволновых ОВЧ-диапазонов (4 м и 2 м) помехи обычно возникают во всех направлениях, независимо от конкретного местоположения ветряной электростанции. В случае коротковолновых УВЧ-диапазонов (особенно 23 см и 13 см) уровень помех в непосредственной близости от ветряной электростанции зависит от расположения отдельных ветряных турбин, тогда как на больших расстояниях ветряная электростанция в целом действует как отражающая поверхность. Пеленг в этих диапазонах частот также подвержен высоким уровням колебаний.

Ошибки пеленга могут принимать форму высокодисперсных результатов пеленгации во всех четырех квадрантах, отдельных дискретных ошибок или пеленгов, колеблющихся вокруг фиктивного среднего значения.

Внутри ветряной электростанции коротковолновый радиопеленгатор ведет себя хаотично. Даже когда ветропарк расположен на расстоянии 2,5 км, имеется всего лишь узкий сектор, поперечный по отношению к ветряной электростанции, в котором теоретически возможен достоверный пеленг. На расстоянии 4,6 км ситуация улучшается настолько, что значительные ошибки пеленгации появляются только в направлении ветряной электростанции и в противоположном направлении. Однако в этом исследовании не рассматривалось влияние на прием коротковолновыми радиопеленгаторами ионосферных волн.

Во всех частотных диапазонах выявленные ошибки пеленгации превышают  $\pm 20^\circ$  (а в некоторых случаях имеют место даже круговые ошибки). Ошибки пеленгации, превышающие  $2^\circ$ , уже препятствуют своевременному исследованию помех на частотах безопасности (полиция, воздушная радиосвязь и т. д.) и эффективному выявлению использования частот в случае помех или при проверке занятости полосы.

Выявленные колебания уровня величиной до 40 дБ (что соответствует потере 99,99% сигнала) делают невозможными точные измерения напряженности поля и ставят под угрозу потенциально необходимое декодирование аналоговых и цифровых радиопередач.

Исследование показывает, что ветряные турбины и стационарные радиопеленгаторы несовместимы на расстояниях до менее 4,6 км. Зарегистрированные помехи свидетельствуют о том, что в таких условиях работа станции радиоконтроля Федерального сетевого агентства в соответствии с надлежащими требованиями невозможна.

## Содержание Приложения 1

	<i>Стр.</i>
1 Введение.....	4
2 Полосы частот .....	6
3 Проведение измерений .....	6
4 Области измерений .....	7
4.1 Измерения на ветряной электростанции .....	7
4.2 Контрольные измерения .....	8
5 Измерительные установки.....	11
5.1 Передвижной радиопеленгатор.....	11
5.2 Передвижной передатчик .....	11
6 Расчет пеленга .....	15
7 Местоположения радиопеленгаторов .....	15
7.1 Радиопеленгатор 0 – центр ветряной электростанции.....	15
7.2 Радиопеленгатор 1 – граница ветряной электростанции .....	17
7.3 Радиопеленгатор 2 – в 2,5 км от ветряной электростанции .....	18
7.4 Радиопеленгатор 3 – в 4,6 км от ветряной электростанции .....	19
8 Пути измерения .....	20
9 Результаты пеленгации .....	22
9.1 Контрольные измерения .....	22
9.2 Серии измерений .....	33
10 Измерения уровня сигнала .....	63
10.1 Чувствительность системы.....	65
10.2 Регистрация во временной области .....	65
10.3 Анализ уровня сигнала .....	69

## 1 Введение

Федеральное сетевое агентство по электроэнергетике, газоснабжению, электросвязи, почтовой связи и железным дорогам (Bundesnetzagentur) – это автономный высший федеральный орган в сфере деятельности Федерального министерства экономики и энергетики Федеративной Республики Германия со штаб-квартирой в Бонне. В соответствии с Законом об электросвязи (TKG) в круг его задач входит регулирование использования радиочастот в ФРГ, контроль за соблюдением условий их присвоения, расследование случаев помех в связи с использованием радиочастот и устранение любых возникающих нарушений.

С этой целью Федеральное сетевое агентство эксплуатирует семь станций радиоконтроля, оснащенных радиопеленгаторной аппаратурой и зарегистрированных и признанных МСЭ (Международный союз электросвязи), которые расположены по всей территории Германии. Эти станции могут определять направление, с которого осуществляется радиопередача, относительно их местоположения. Затем на основании этой информации может быть определено вероятное местоположение передатчика. Из этих семи станций радиоконтроля лишь четыре оснащены дополнительными коротковолновыми радиопеленгаторами (РП), что обусловлено высокими инвестиционными затратами и топографическими требованиями к расположению такого оборудования.

Станция радиоконтроля Крефельд/Рёрт



Коротковолновый радиопеленгатор



Одна из таких станций – станция радиоконтроля в Рёрте близ Крефельда. Из-за требования однородной среды, а также для предотвращения побочных излучений и ошибок пеленгации, вызванных окружающими зданиями, коротковолновый радиопеленгатор был построен вдали от зданий, эксплуатируется дистанционно и располагается на плоской равнине, используемой исключительно в сельскохозяйственных целях.

Полезность радиопеленгатора, основанная на уверенности в его способности давать точные результаты пеленгации, зависит от его местоположения. Ему требуется "беспрепятственный обзор" своей зоны приема, и он не должен подвергаться помехам от окружающих конструкций (таким как шум, источником которого являются промышленные или торговые районы). Поэтому радиопеленгаторы по возможности располагаются вдали от развитых районов.

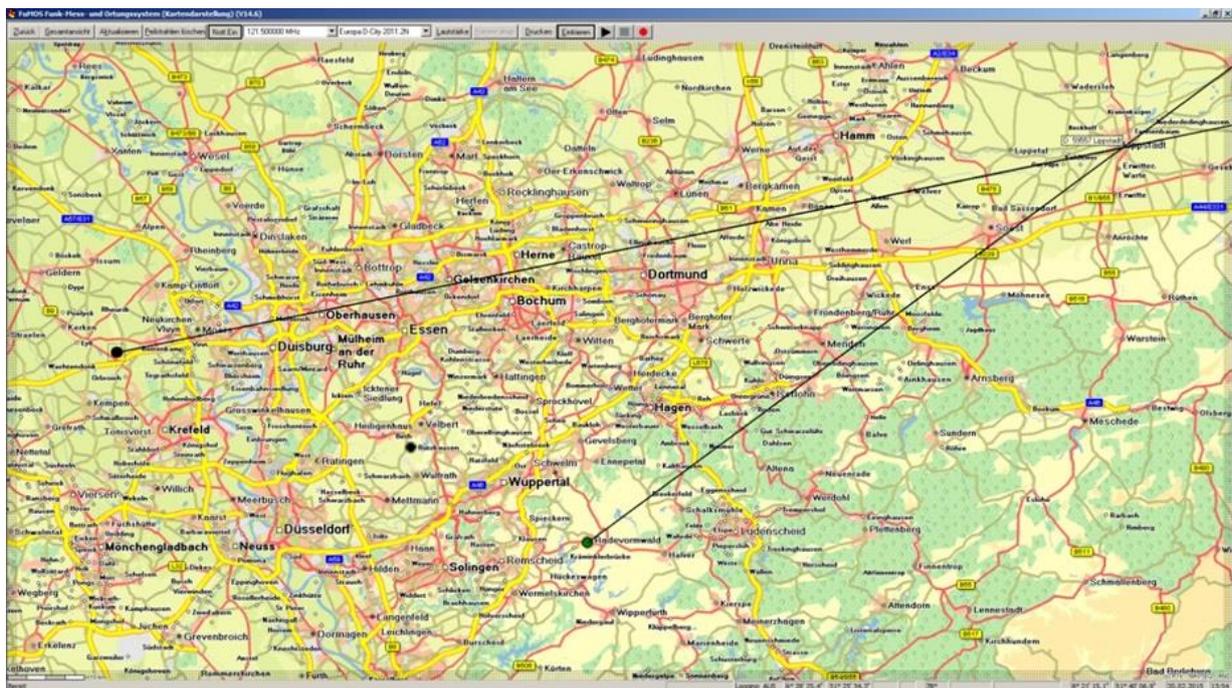
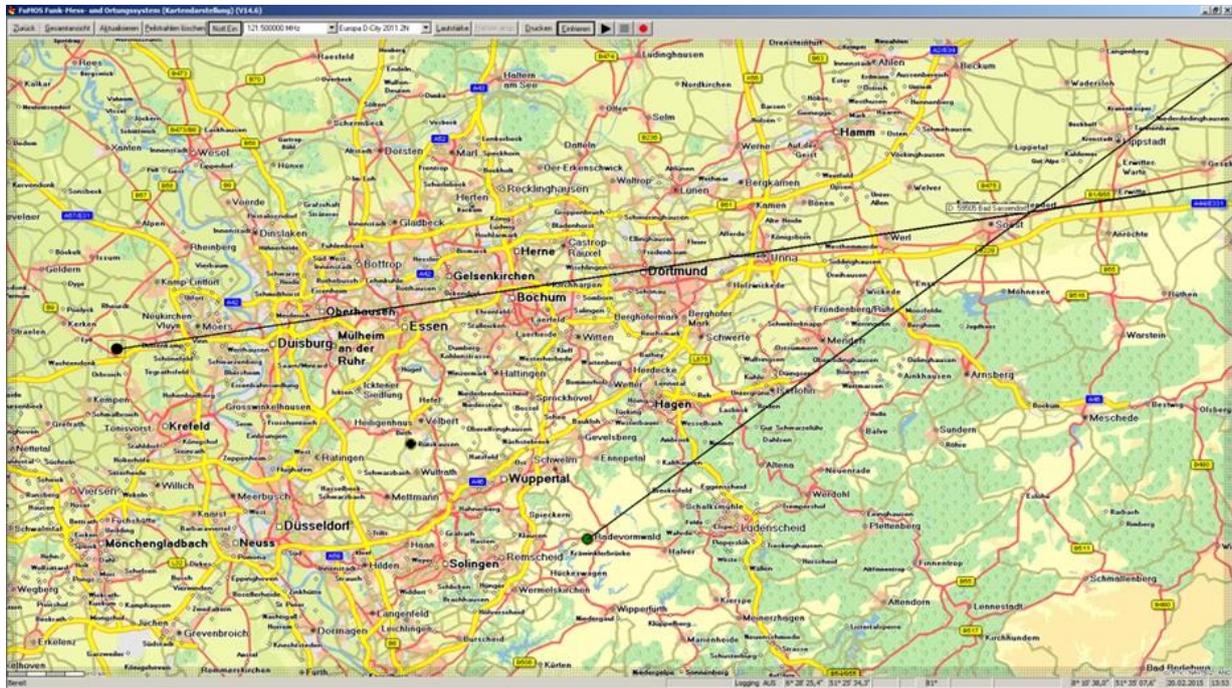
Производители радиопеленгаторных систем определяют высоту пролета препятствий, требуемую для правильной работы системы в соответствии с согласованными условиями. Также учитываются требования оператора системы, перечисленные в соответствии с важностью рассматриваемых полос частот. Службы безопасности, такие как службы воздушной радиосвязи, службы полицейской радиосвязи и аварийно-спасательные службы, имеют более высокий приоритет, и их диапазоны должны исследоваться гораздо быстрее других, таких как радиоловительские частоты, используемые только для досуговой деятельности.

Для коротковолнового радиопеленгатора, используемого на станции Крефельд/Рёрт, производитель (компания Plath со штаб-квартирой в Гамбурге) установил, что высота пролета препятствий в виде конуса с углом возвышения  $3^\circ$  от центра радиопеленгатора должна поддерживаться в радиусе 2000 м.

Это означает, что на расстоянии 2000 м допускаются здания максимальной высотой около 105 м ( $2000 \text{ м} \times \tan 3^\circ \approx 105 \text{ м}$ ). В случае ветряных электростанций также должна учитываться максимальная высота конца лопастей, поскольку скорость и направление их вращения влияют на степень, в какой площадь ометания лопастей служит препятствием для приема радиосигналов. При использовании коротковолновых радиопеленгаторов "допустимое расстояние" в тех местах, где планируется установить ветряные турбины высотой 190 м, составляет около 3,8 км.

На расстоянии 200 км погрешность пеленгации всего в  $3^\circ$  вызывает отклонение пеленга на 10,5 км и, следовательно, делает невозможным определение места, из которого ведется передача.

Значение пеленга изменилось с  $81^\circ$  до  $78^\circ$  от Рёрта



В рассматриваемом примере в случае ошибки пеленгации всего на 3° целевой район смещается от города Зост к городу Липпштадт, расположенному в 10 км от него.

Поэтому в Справочнике по контролю за использованием спектра МСЭ (включающем применимые на глобальном уровне руководящие принципы по сооружению станций радиоконтроля) рекомендуется обеспечивать расстояние в 2000 м между станциями радиоконтроля и отдельными ветряными турбинами и зону безопасности радиусом 5000 м вокруг станции радиоконтроля для защиты от воздействия ветряных электростанций.

Настоящее исследование вызвано планируемым назначением приоритетной области развития ветроэнергетики вокруг фиксированной станции радиоконтроля и приемной системы службы радиоконтроля и инспекции в Рёрте, как предложено в региональном плане администрации Дюссельдорфа. Цель этого исследования состоит в том, чтобы заранее выявить возможное влияние реализации этих планов на ВЧ- и ОВЧ/УВЧ-пеленгаторы и определить критическое расстояние от ветряных турбин, на котором это влияние будет допустимым.

## 2 Полосы частот

В этом исследовании рассматриваются все соответствующие полосы частот в диапазонах ОВЧ/УВЧ. В следующей таблице представлен обзор отдельных полос частот и основные области их применения.

Полоса частот	Длина волны	Область применения
65–87,5 МГц	4 м	Органы власти и организации, занимающиеся вопросами общественной безопасности (полиция, пожарная служба, аварийно-спасательные службы), федеральные вооруженные силы, железные дороги, частная подвижная радиосвязь (PMR), местный пейджинг, вспомогательное радиовещание
108–174 МГц	2 м	Служба воздушной радиосвязи, органы власти и организации, занимающиеся вопросами общественной безопасности, федеральные вооруженные силы, радиосвязь с такси, приложения внутренней радиосвязи, морская подвижная служба и служба внутренних водных путей сообщения, любительская радиосвязь
400–470 МГц	70 см	Органы власти и организации, занимающиеся общественной безопасностью, аналоговая и цифровая транкинговая подвижная радиосвязь, приложения внутренней радиосвязи, любительская радиосвязь, службы передачи данных по подвижным сетям, радиоастрономия
800–1 100 МГц	30 см	Подвижная связь, федеральные вооруженные силы, воздушная радионавигационная служба, радиоопределение, радиоастрономия
1 200–1 400 МГц	23 см	Радиоопределение (радиолокация, GPS, Galileo), спутниковая связь, любительская радиосвязь
2 000–3 000 МГц	13 см	Подвижная связь, WLAN, органы власти и организации, занимающиеся вопросами общественной безопасности, ретрансляция радиосигналов, спутниковая связь, федеральные вооруженные силы, воздушная радионавигационная служба, радиоопределение, радиоастрономия, любительская радиосвязь

Указанные длины волн следует рассматривать как показательные для отдельных полос частот.

## 3 Проведение измерений

В измерениях принимали участие следующие стороны (в разных сочетаниях):

- служба радиоконтроля и инспекции Дармштадта;
- служба радиоконтроля и инспекции Рёрта;

- разработчик программного обеспечения GPS\_Azimuth (см. пункт б).

Измерения проводились в период с 26 по 30 января и с 5 по 8 февраля 2015 года на территории и в окрестностях ветряной электростанции в Харене (Эмсланд), а контрольные измерения – в период с 18 по 20 февраля того же года на открытой местности вблизи деревни Керкен-Альдекерк.

## 4 Области измерений

### 4.1 Измерения на ветряной электростанции

Перед проведением измерений были предприняты усилия по поиску на федеральной территории ветряной электростанции, отвечающей следующим критериям:

- достаточно большое количество ветряных турбин последнего поколения;
- плоский ландшафт;
- малоосвоенная территория в радиусе 5 км от ветряной электростанции;
- отсутствие влияния лиственных деревьев.

В конечном счете была выбрана ветряная электростанция в Харене (Эмсланд), поскольку это место представляется наиболее соответствующим вышеуказанным критериям. Ветряная электростанция в Харене состоит из 29 ветряных турбин, принадлежащих городу Харен/Эмсланд, и расположена в районе Рютенмор, в непосредственной близости от границы Нидерландов. Очищенная территория, которая раньше была заболоченной, занимает приблизительно 295 га и теперь интенсивно используется в сельскохозяйственных целях.

Ветряная электростанция в Харене (Эмсланд)



На территории ветряной электростанции установлено 29 ветряных турбин ENERCON E-70-4 эффективной мощностью 2 МВт и ветряных турбин ENERCON E-66-1 эффективной мощностью 1,8 МВт. Высота ствола всех турбин идентична (98 м). Турбины оснащены новейшими лопастями ротора (с конической законцовкой), гарантирующими оптимальное использование энергии ветра.

**Ветряная электростанция в Харене**  
(синими точками обозначено местоположение ветряных турбин)



#### 4.2 Контрольные измерения

Производитель антенн радиопеленгаторов для диапазона ВЧ и антенн для диапазонов ОВЧ/УВЧ в своих спецификациях указывает, что максимально допустимая среднеквадратическая ошибка пеленгации составляет  $\leq 2^\circ$ .

## Specifications

Frequency range (in two sub-ranges)	VHF / UHF I UHF II	20 MHz to 1300 MHz 1300 MHz to 3000 MHz
Antenna type	VHF / UHF I UHF II	1 nine-element and 1 eight-element circular array
Polarization		vertical
Nominal impedance		50 $\Omega$
DF error <sup>1</sup>		$\leq 2^\circ$ RMS
DF sensitivity <sup>2</sup> (see Fig. 4-1)	20 MHz to 200 MHz 200 MHz to 1300 MHz 1300 MHz to 3000 MHz	12 $\mu\text{V/m}$ to 1.0 $\mu\text{V/m}$ typ. < 2 $\mu\text{V/m}$ typ. 2.5 $\mu\text{V/m}$ to 10 $\mu\text{V/m}$ typ.
Antenna factor (see Fig. 4-2)		see also Interface Description 4071.4004.01 SB
Linearity		IP2: 65 dBm typ. IP3: 30 dBm typ.
Connectors	DF1 DF2 DF3 CAL control and power supply compass connector	N-type female N-type female N-type female N-type female SJT-07GS-12-35P-014 SJT-07GS-10-35S-RF45
Power supply (by the DF processor)	voltage current	15 V DC to 18 V DC < 1.6 A
Dimensions	diameter height length of lightning protection rod	approx. 1.1 m approx. 0.45 m approx. 1.4 m with lightning protection rod approx. 1 m

<sup>1</sup> On mast, in reflection-free environment. The RMS value is calculated from the DF values averaged over azimuth and frequency. On thin masts (4 m to 8 m), an additional DF error of up to 2° may occur at frequencies between 20 MHz and 40 MHz due to possible self-resonance.

<sup>2</sup> DF bandwidth 0.6 kHz, average time 1 s, DF error  $\leq 2^\circ$ .

В целях проверки этой информации были проведены контрольные измерения для антенн радиопеленгаторов (РП) для диапазонов ВЧ и ОВЧ/УВЧ вблизи обслуживаемой персоналом станции радиоконтроля на используемых в сельскохозяйственных целях равнинных землях недалеко от деревни Керкен.

## Контрольные измерения в диапазонах ВЧ и ОВЧ/УВЧ



Эти измерения показывают, что в однородной среде, на которую не оказывают влияния помехи от таких конструкций, как ветряные турбины, в большинстве случаев можно оставаться в пределах указанной производителем максимальной среднеквадратической погрешности пеленгации  $\pm \leq 2^\circ$ . Более подробная информация приведена в пункте 9.1.

## 5 Измерительные установки

### 5.1 Передвижной радиопеленгатор

В качестве квазистационарного радиопеленгатора использовался контрольно-измерительный автомобиль Mercedes Sprinter, оснащенный системой пеленгации и соответствующими антеннами (диапазоны частот 30–3000 МГц и 1–30 МГц). Антенны радиопеленгатора работали на телескопической мачте высотой 8 м над землей.

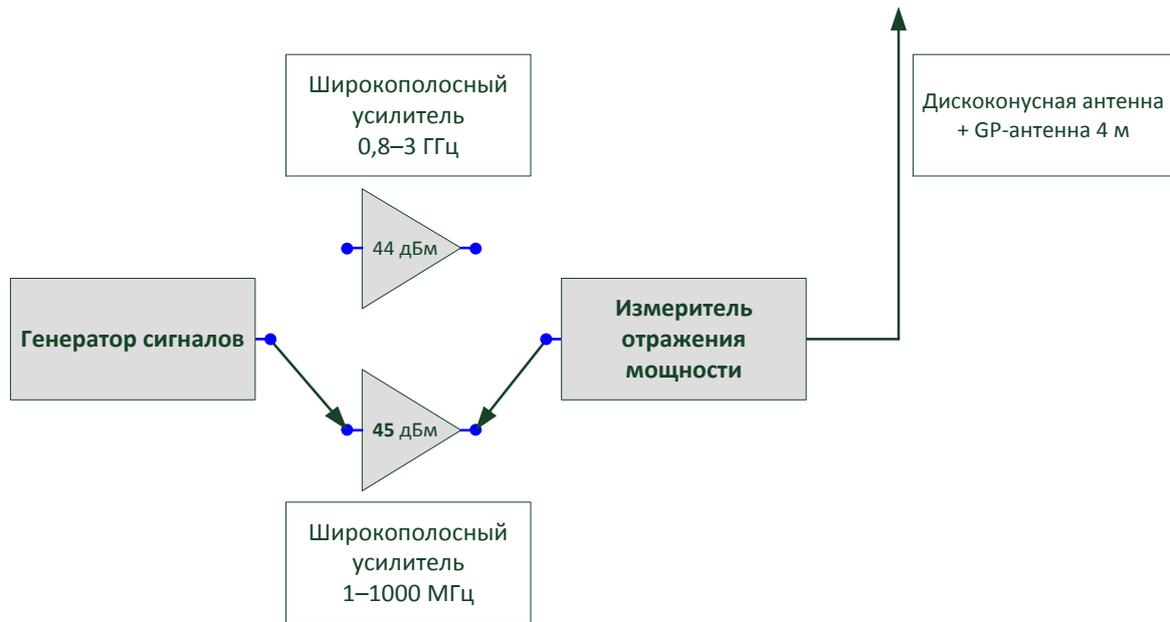


Для внутренней связи использовались портативные радиостанции и ретрансляционная аппаратура того же производителя.

### 5.2 Передвижной передатчик

Сигнал передачи формировался генератором сигналов и при необходимости усиливался до выходной мощности 25 Вт с использованием широкополосных усилителей. Для частот 146 МГц, 440 МГц, 971 МГц, 1300 МГц и 2400 МГц использовалась широкополосная дискоконусная передающая антенна, а для частоты 87,45 МГц – другая, вертикальная антенна с дополнительными горизонтальными отражающими элементами в нижней части (GP). Обе антенны были установлены и работали на 10-метровой телескопической мачте, установленной на контрольно-измерительном автомобиле Mercedes Sprinter.

## Блок-схема передатчика ОВЧ/УВЧ



## Контрольно-измерительный автомобиль с 10-метровой мачтой и передающей антенной

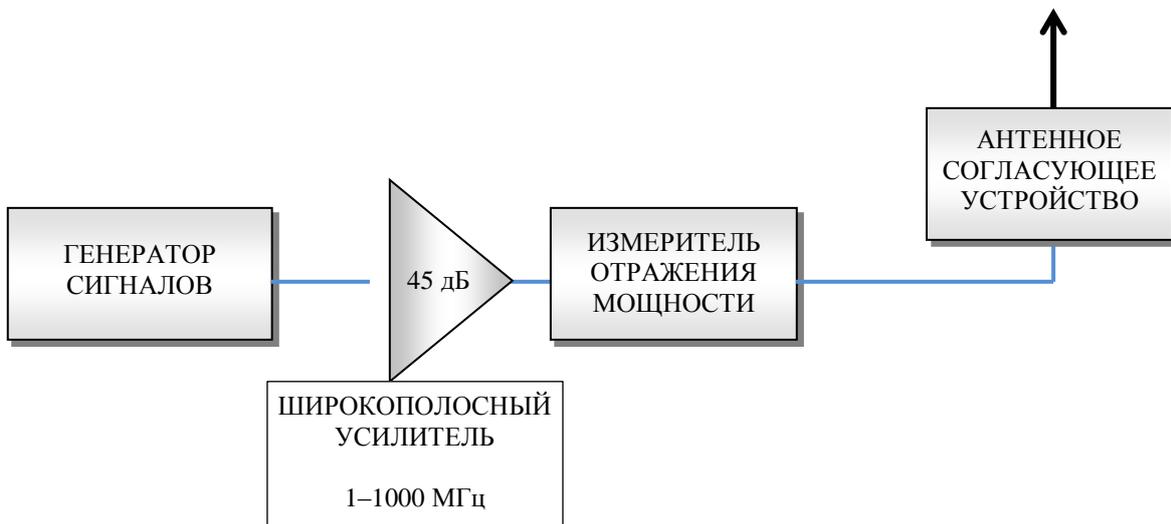


## Усилители



После усиления (при необходимости) производилась передача в диапазоне ВЧ (5,46 МГц, 14 МГц и 28 МГц) с использованием антенного согласующего устройства (АСУ) (тюнера антенны) и вертикальной антенны высотой приблизительно 3 м.

## Блок-схема ВЧ-передатчика



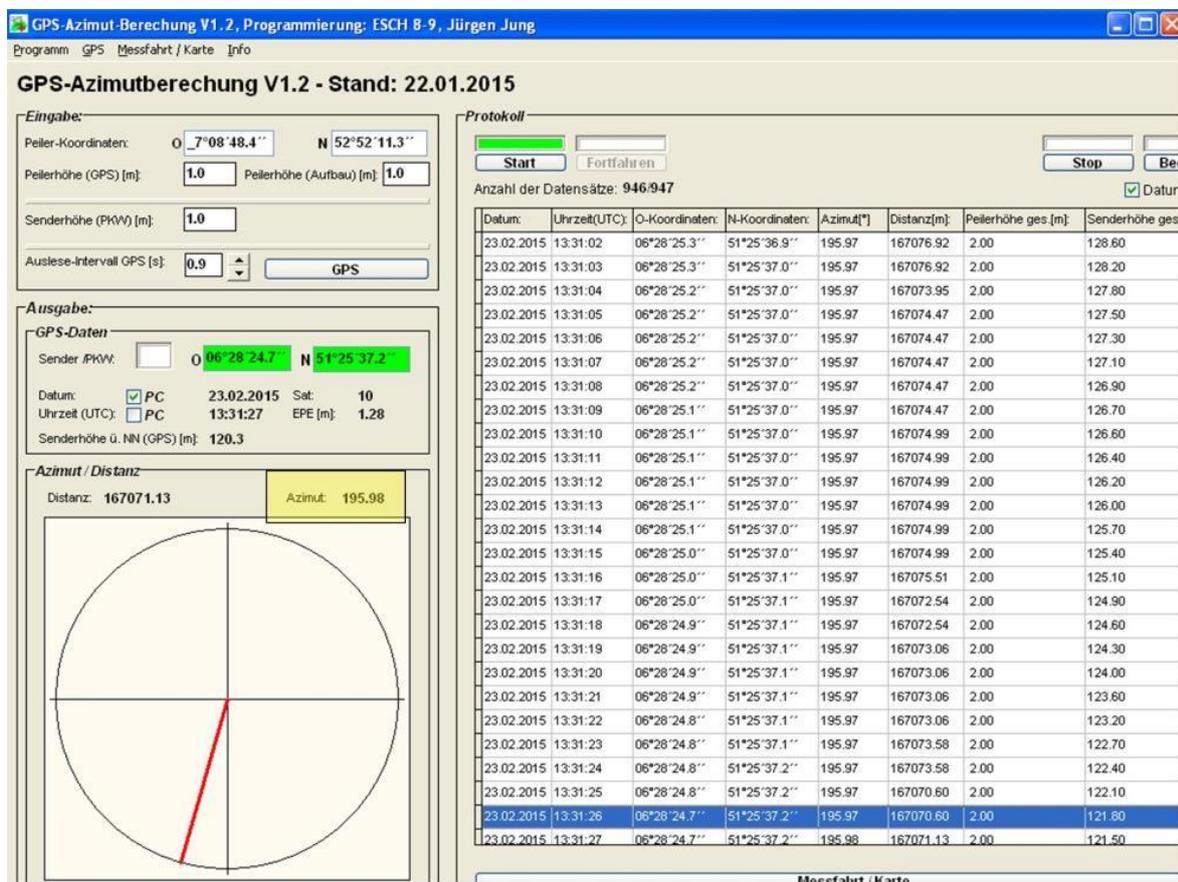
## Контрольно-измерительный автомобиль с вертикальной ВЧ-антенной



## 6 Расчет пеленга

Для расчета азимута между радиопеленгатором и передатчиком (целевого пеленга) в каждом местоположении передвижного передатчика использовалась разработанная Федеральным сетевым агентством программа GPS\_Azimuth. Она автоматически вычисляет пеленг на основе координат радиопеленгатора и соответствующих координат автомобиля, предоставляемых GPS-приемником.

Интерфейс программы GPS\_Azimuth (пеленг выделен желтым цветом)

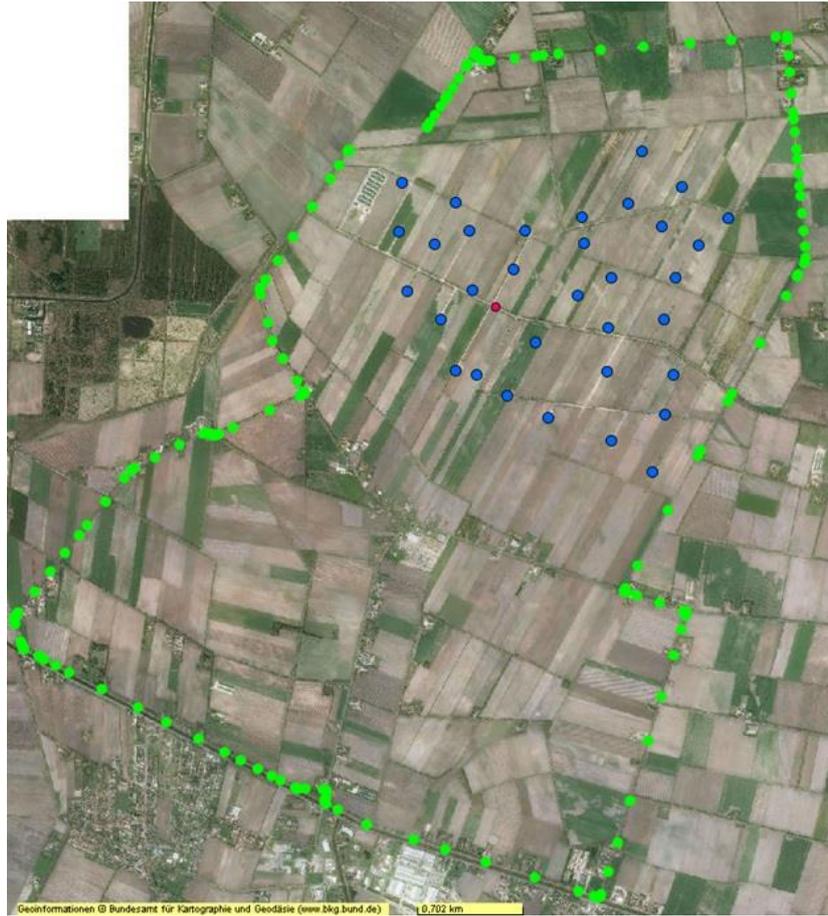


## 7 Местоположения радиопеленгаторов

### 7.1 Радиопеленгатор 0 – центр ветряной электростанции

Выбор места расположения для радиопеленгатора в центре ветряной электростанции соответствует ожидаемой ситуации, если планируемое региональной администрацией назначение приоритетной области развития ветряной энергетики Ker\_Wind\_007 состоится в соответствии с предложением. В этом случае радиопеленгатор будет со всех сторон окружен ветряными турбинами. Результаты измерений представлены в пункте 9.2.1.

Расположение радиопеленгатора (красная точка) в окружении ветряных турбин (синие точки)



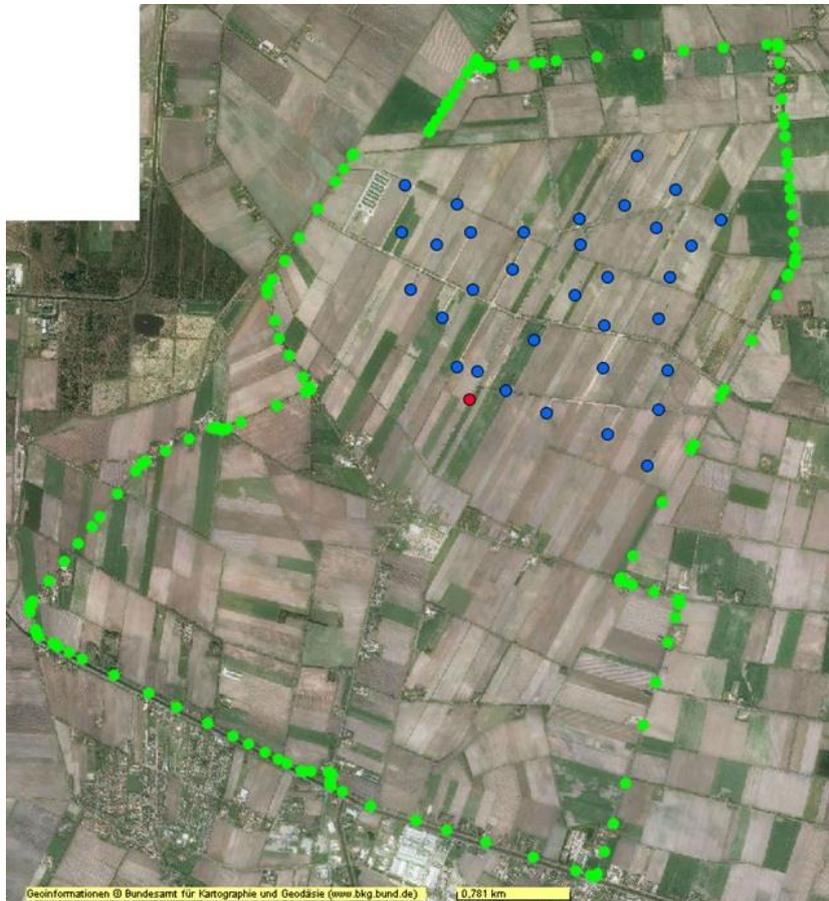
Расположение радиопеленгатора внутри ветряной электростанции



## 7.2 Радиопеленгатор 1 – граница ветряной электростанции

Этот радиопеленгатор расположен на границе ветряной электростанции с беспрепятственным обзором в южном направлении и ветряными турбинами в северном. Результаты измерений представлены в пункте 9.2.2.

Расположение радиопеленгатора (красная точка) на границе ветряной электростанции (синие точки)



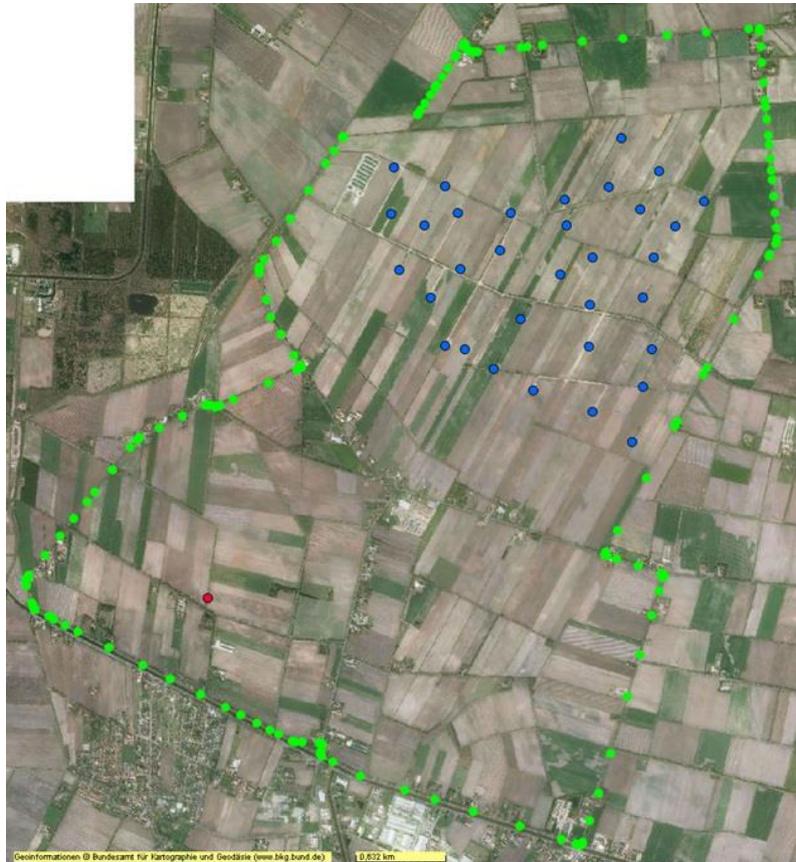
Расположение радиопеленгатора на границе ветряной электростанции



### 7.3 Радиопеленгатор 2 – в 2,5 км от ветряной электростанции

Этот радиопеленгатор расположен примерно в 2,5 км от ветряной электростанции с беспрепятственным видом на данную электростанцию в северо-восточном направлении. Результаты измерений представлены в пункте 9.2.3.

Расположение радиопеленгатора (красная точка)  
на юго-западе от ветряной электростанции (синие точки)



Радиопеленгатор, расположенный в 2,5 км от ветряной электростанции  
(виднеется на заднем плане)



#### 7.4 Радиопеленгатор 3 – в 4,6 км от ветряной электростанции

Этот радиопеленгатор расположен на самом на дальнем расстоянии (4,6 км) от ветряных турбин. Результаты измерений представлены в пункте 9.2.4.

Радиопеленгатор (красная точка), расположенный в 4,6 км от границы ветряной электростанции (синие точки), если брать расстояние птичьего полета



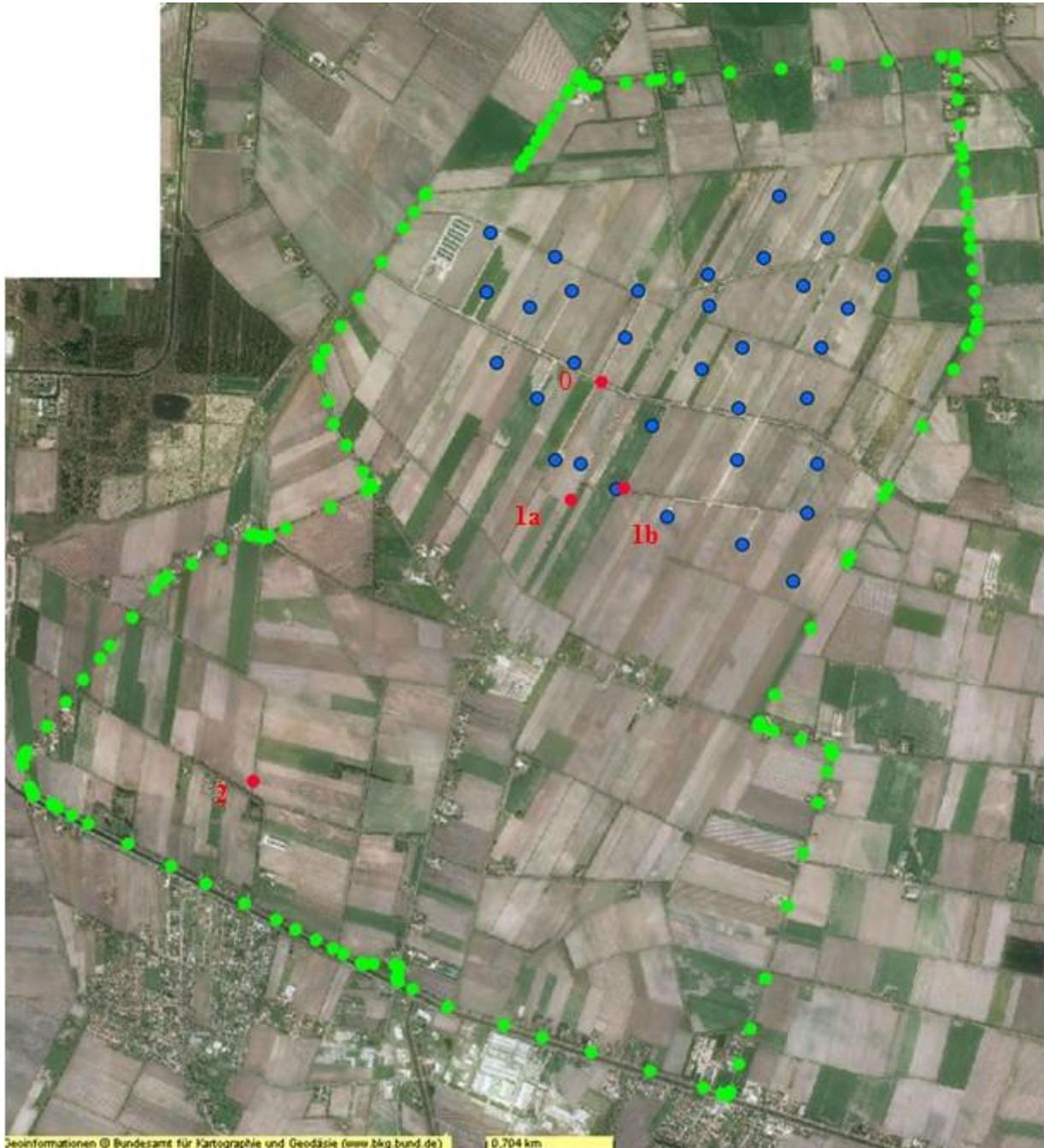
Радиопеленгатор, расположенный в 4,6 км от ветряной электростанции



## 8 Пути измерения

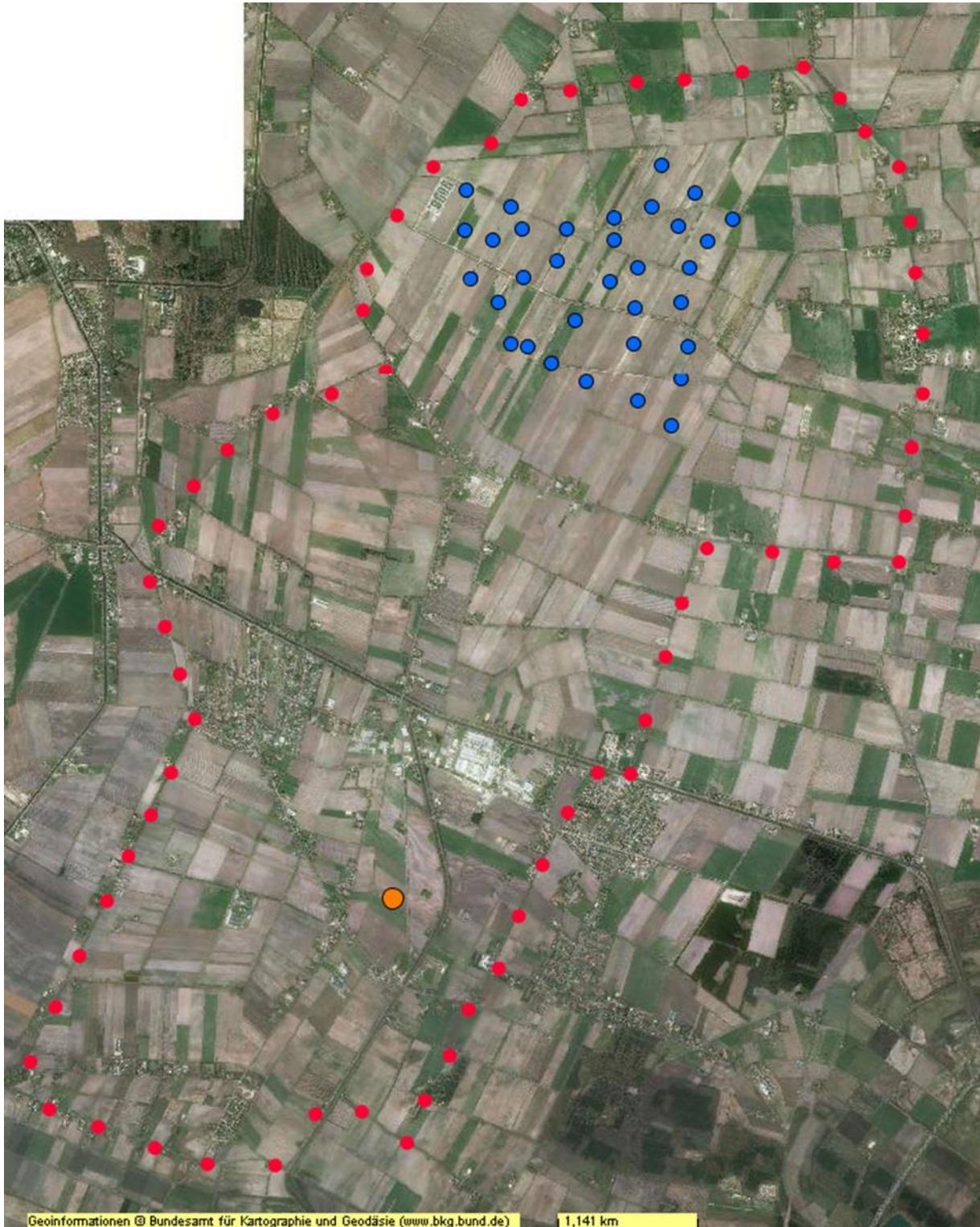
Оснащенный передатчиком автомобиль Mercedes Sprinter перемещался с шагом  $10^\circ$  вокруг места расположения радиопеленгатора и ветряной электростанции вдоль пути, обозначенного зелеными точками. При планировании маршрута учитывалась существующая инфраструктура. Некоторые участки пути не имели дорожного покрытия и были доступны только для полноприводного варианта Mercedes Sprinter.

**Путь передатчика (зеленые точки) вокруг местоположения ветряной электростанции и радиопеленгаторов 0-2**



Для местоположения радиопеленгатора 3 путь передатчика (красная линия точек) пришлось значительно увеличить, чтобы зона измерения охватывала радиопеленгатор и ветряную электростанцию.

Участок измерения (красные точки) вокруг местоположения ветряной электростанции и радиопеленгатора 3



## 9 Результаты пеленгации

### 9.1 Контрольные измерения

На диаграммах, приведенных на следующих страницах, область допустимых значений для стационарных радиопеленгаторов службы радиоконтроля и инспекции выделена цветом. Прежде всего этот расчет проводился на основе спецификаций радиопеленгаторной системы в соответствии с пунктом 4.2 и с учетом влияния ошибок пеленгации в соответствии с пунктом 1.

Как упоминалось ранее, стационарные радиопеленгаторы для выполнения своей функции должны устанавливаться на мачтах достаточной высоты, расположенных в условиях беспрепятственной видимости. Задача заключалась в том, чтобы воспроизвести эти условия с помощью передвижной измерительной установки, так чтобы при ограниченных затратах можно было провести исследования, результаты которых применимы к стационарным радиопеленгаторам.

#### Проведение контрольных измерений на открытой местности возле деревни Керкен



9.1.1 ОВЧ/УВЧ

Для проверки измерительной установки использовалось контрольное измерение в соответствии с пунктом 4.2. Результаты представлены ниже.













В диапазонах длин волн 4 м, 2 м, 70 см, 30 см и 23 см полученные результаты измерений в основном находились в пределах допуска для стационарных радиопеленгаторов. Только в диапазонах 2 м и 30 см по отдельным направлениям допуск был превышен на  $1^\circ$ . Даже в диапазоне 13 см, особенно критичном из-за короткой длины волны, допуск был превышен лишь один раз на  $2^\circ$  и в двух направлениях – на  $1^\circ$ .

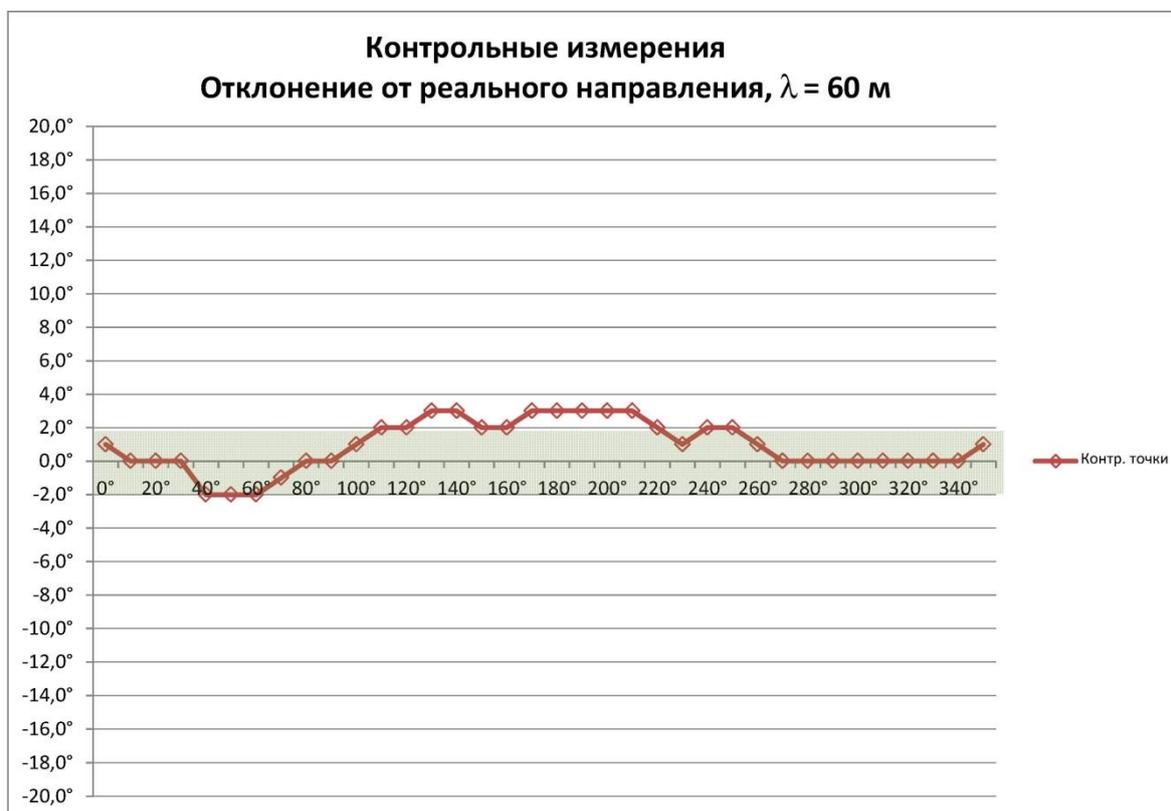
Граница колебаний значения пеленга, которая важна для оценки результатов пеленгации, во всех без исключения случаях находилась в допустимом диапазоне.

Таким образом, измерительную установку можно использовать для проведения предполагаемых исследований.

### 9.1.2 ВЧ

Заказчик также попросил собрать информацию для ВЧ-диапазона, охватывающего диапазон частот 3–30 МГц и, следовательно, диапазон длин волн 80–10 м. Поскольку размер антенн в значительной мере зависит от предполагаемой рабочей длины волны, в диапазоне ВЧ по физическим причинам требуется использовать большие антенны, не совместимые с методом измерений с применением подвижных измерительных установок. С помощью технических приемов можно уменьшить размер антенны. Однако это приводит к снижению эффективности излучения и, возможно, к искаженной диаграмме направленности излучения. Другие воздействия могут быть вызваны излучением от измерительной установки (кабелей и т. д.), что создает горизонтальные компоненты излучения, которые могут повлиять на работу радиопеленгатора.

Поэтому контрольные измерения для ВЧ-диапазона проводились также и для измерительной установки в соответствии с пунктом 5. Результаты представлены ниже.









Для диапазона 60 м отклонения значений пеленга в основном оставались в допустимых пределах со значениями чуть более 1°. Однако в диапазоне 20 м выход за пределы допуска достигал 10°, а в диапазоне 10 м – 7°.

Ввиду столь значительных отклонений измерительная установка была подвергнута дальнейшим испытаниям. Они показали, что особенно в диапазоне 10 м диаграмма направленности излучения существенно отличается от желаемой всенаправленной диаграммы с четким предпочтительным направлением над передней частью автомобиля и минимумом в его задней части.

Для подвижной измерительной установки необходимо использовать нерезонансную вертикальную симметричную относительно земли передающую антенну. Такая антенна имеет низкую эффективность излучения, которая сильно зависит от противовеса (земли или проводящего корпуса автомобиля). Как описано в пункте 5.2, в случае установки антенны в задней части автомобиля в его передней части (перед антенной) должен находиться высокопроводящий противовес (заземляющая плоскость) при отсутствии противовеса за антенной (в направлении против направления движения) или по сторонам. В диапазоне 10 м размер противовеса в передней части автомобиля составляет половину длины волны, а в диапазоне 20 м – четверть длины волны, что увеличивает эффективность излучения и, следовательно, усиление антенны по ходу автомобиля.

Поэтому в верхней части ВЧ-диапазона всенаправленная диаграмма направленности излучения уже отсутствует; следовательно, радиопеленгатор больше не может правильно функционировать в сильно искаженном поле излучения. Вероятно, что отражения, создаваемые более удаленными объектами, оказывают особенно заметное влияние, вызванное ослабленной прямой волной, излучаемой поперек движения автомобиля.

В диапазоне 60 м противовес в виде крыши автомобиля выступает примерно на 8% от длины волны и, следовательно, оказывает лишь незначительно эффект. Таким образом результирующая эффективность излучения примерно одинаково низкая во всех направлениях при всенаправленной диаграмме направленности, подверженной только влиянию окружающей земли. Для целей этого исследования низкую эффективность излучения можно компенсировать без какого-либо отрицательного эффекта более высокой мощностью передатчика. Можно предположить, что характеристики земли в значительной степени постоянны как в месте контрольного измерения, так и в области Рютенбоккер Мор.

Авторы также хотели бы подчеркнуть, что стационарные коротковолновые радиопеленгаторы работают с ионосферными волнами (отсюда конус безопасности, описанный в пункте 1), а подвижная измерительная установка – с наземными волнами. Поэтому полученные результаты нельзя напрямую перенести на стационарный коротковолновый радиопеленгатор. Поскольку измерения в 60-метровом диапазоне тем не менее дают представление о том, требуется ли вообще безопасное расстояние, то ниже представлены только результаты для диапазона 60 м.

## 9.2 Серии измерений

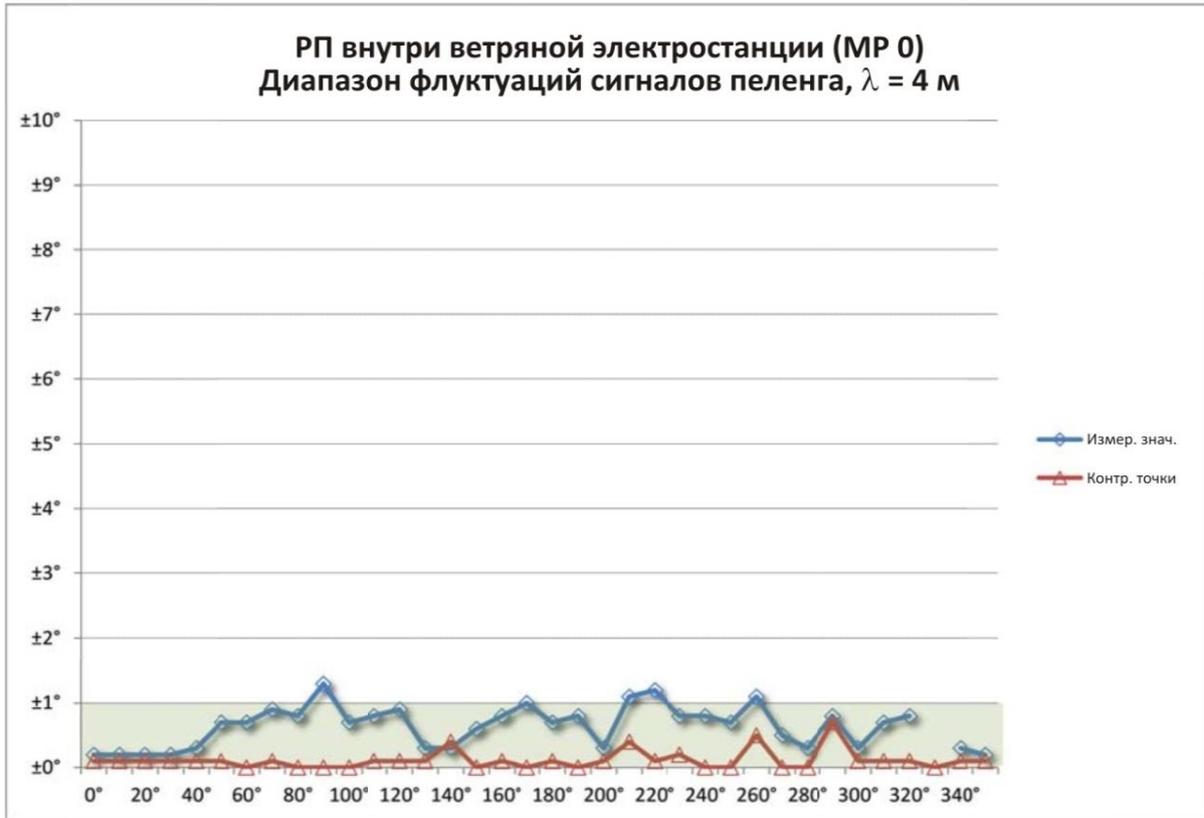
Первая серия измерений касалась вопроса о том, какое влияние испытывает радиопеленгатор, когда он находится в центре ветряной электростанции вблизи ветряных турбин во всех четырех квадрантах пеленгации. Для этого радиопеленгатор был установлен в соответствии с пунктом 7.1. В дальнейших сериях измерений анализировалось влияние, оказываемое на радиопеленгатор, расположенный на границе ветряной электростанции (ветряные турбины в двух квадрантах, см. пункт 7.2), и на радиопеленгатор расположенный в 2,5 км (см. пункт 7.3, один квадрант) и в 4,6 км от ветряной электростанции (см. пункт 7.4).

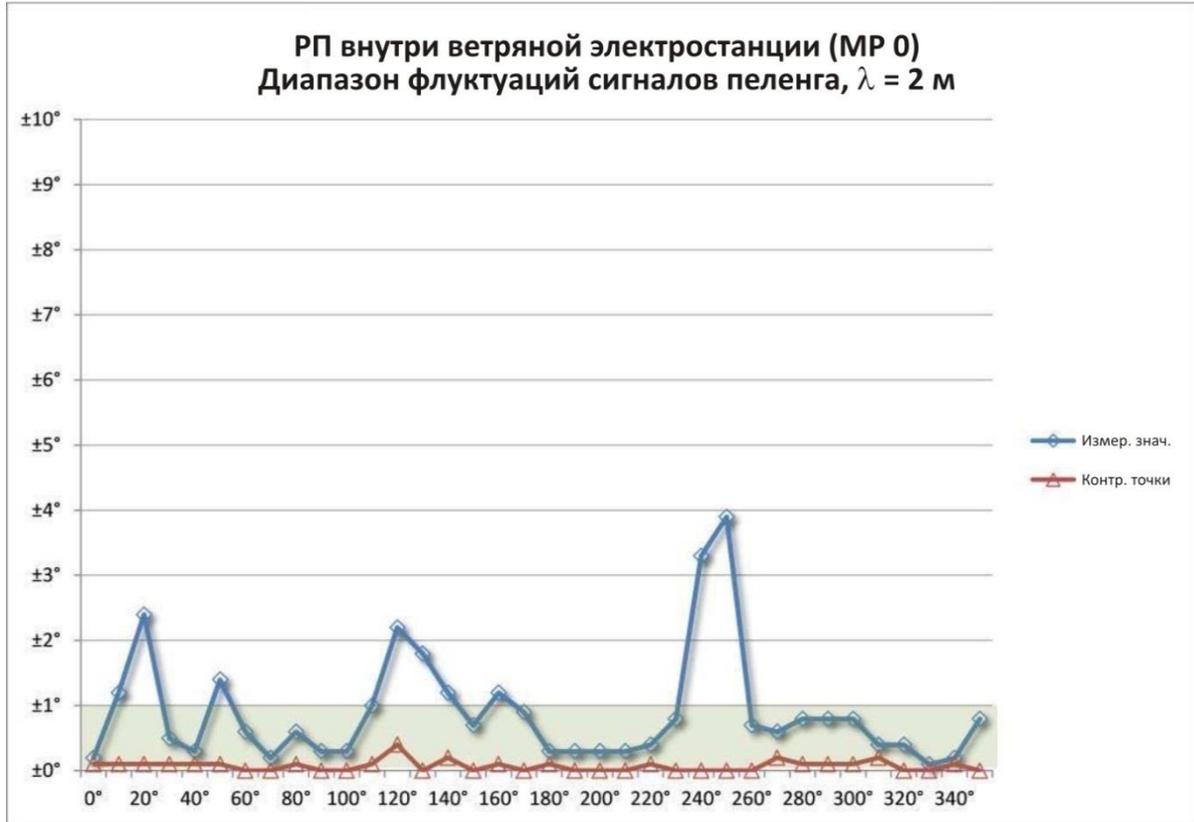
Для лучшей сопоставимости на приведенных ниже диаграммах показаны результаты серии измерений, а также результаты соответствующих контрольных измерений и область допустимых значений.

По всему Отчету используется один и тот же масштаб, чтобы обеспечить прямую сопоставимость всех диаграмм измеряемых переменных. Это означает, что в случае особенно сильного влияния, оказываемого на радиопеленгатор, абсолютный размер отклонения пеленга может быть уже не виден. Это считается приемлемым в целях сравнения и для сохранения разрешения диаграммы в подходящем диапазоне значений. В любом случае результат пеленгации, который находится за пределами области значений, показанной на диаграммах, безусловно не будет использоваться ни в каких приложениях, так что точный размер отклонения, по сути, не имеет значения. Поэтому отклонения в показаниях пеленга, превышающие  $20^\circ$  от истинного значения, считаются круговым пеленгом, особенно если они также сопровождаются заметными колебаниями значений пеленга.

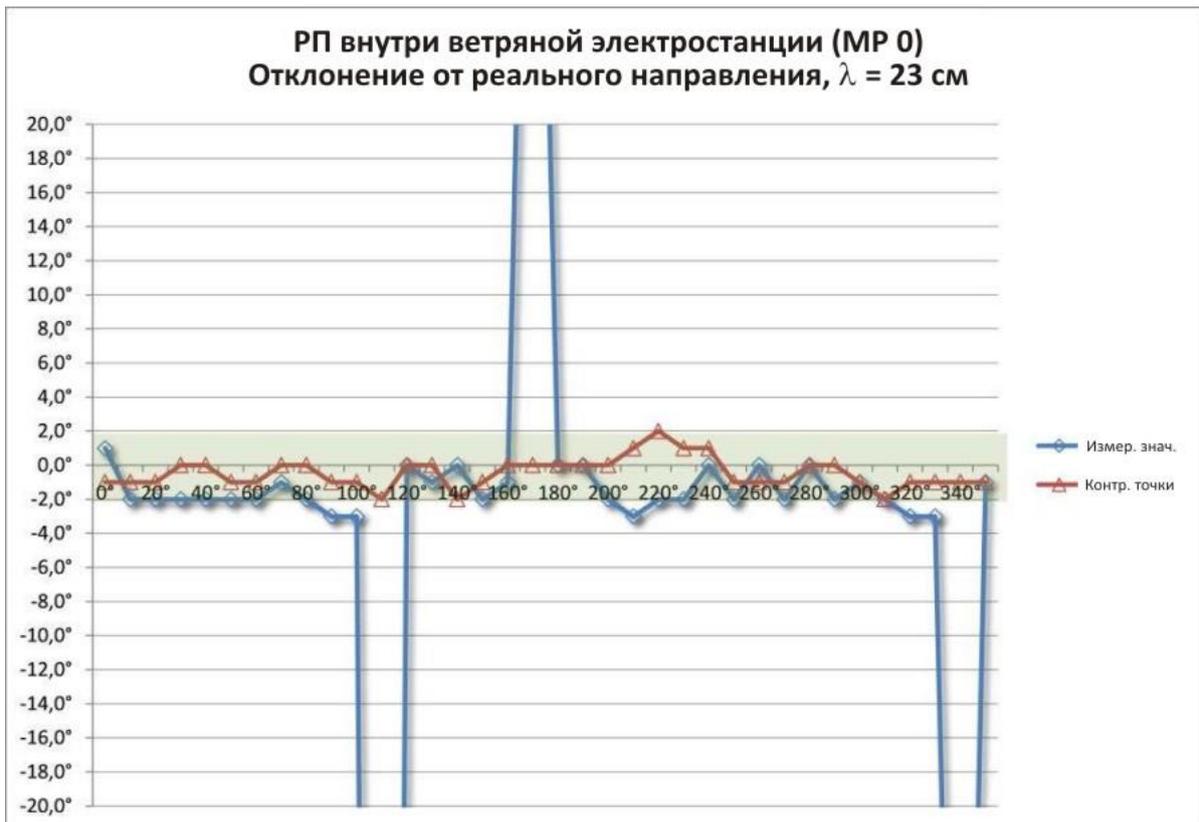
### 9.2.1 Радиопеленгатор (РП), расположенный внутри ветряной электростанции

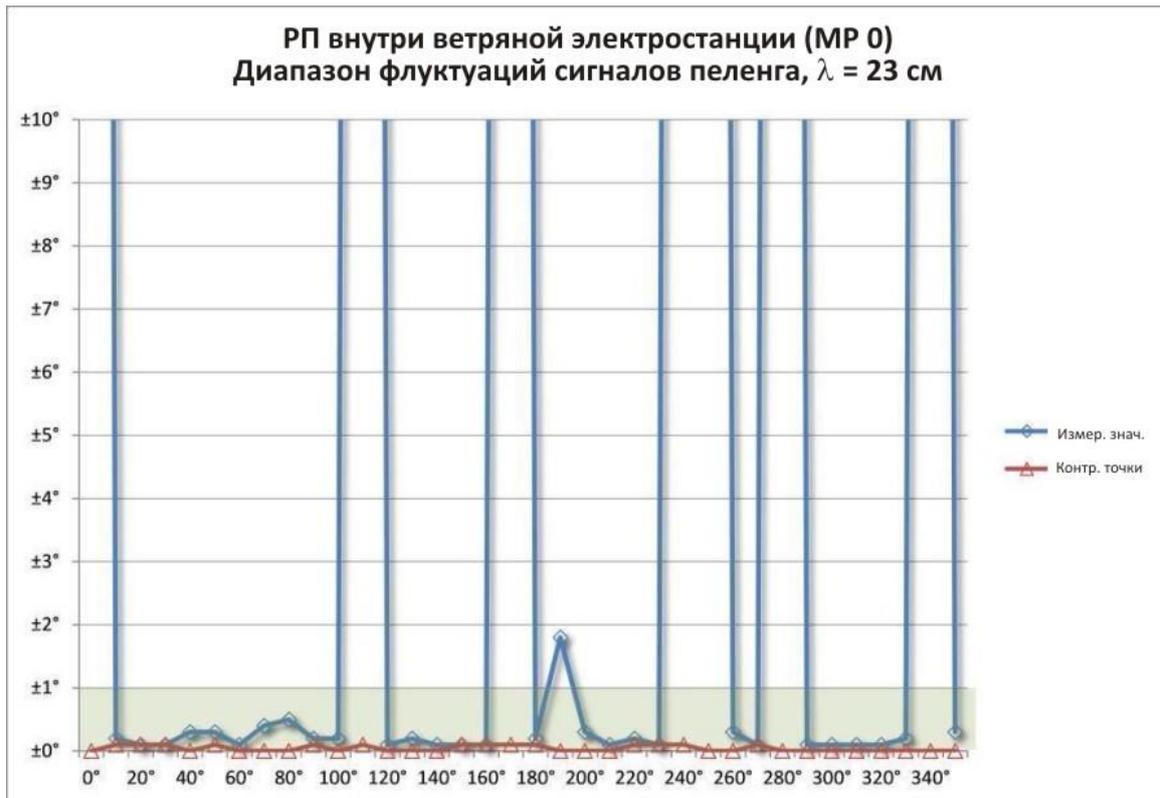


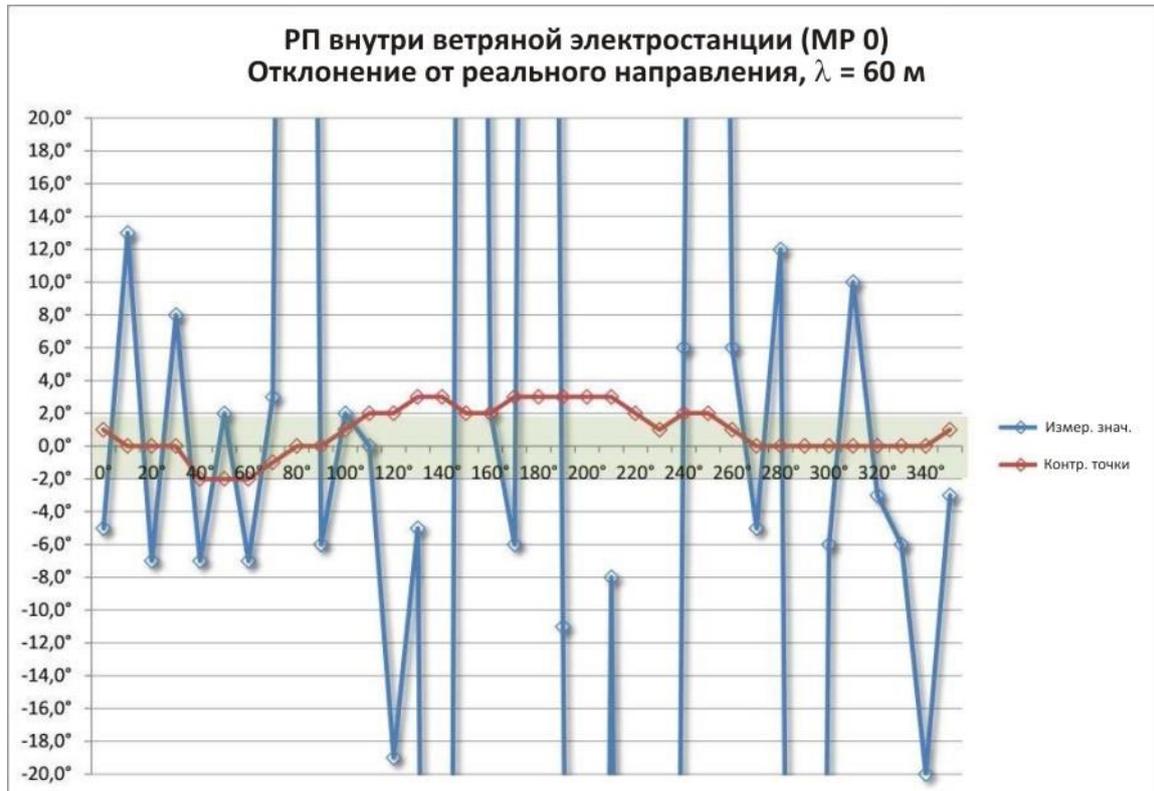
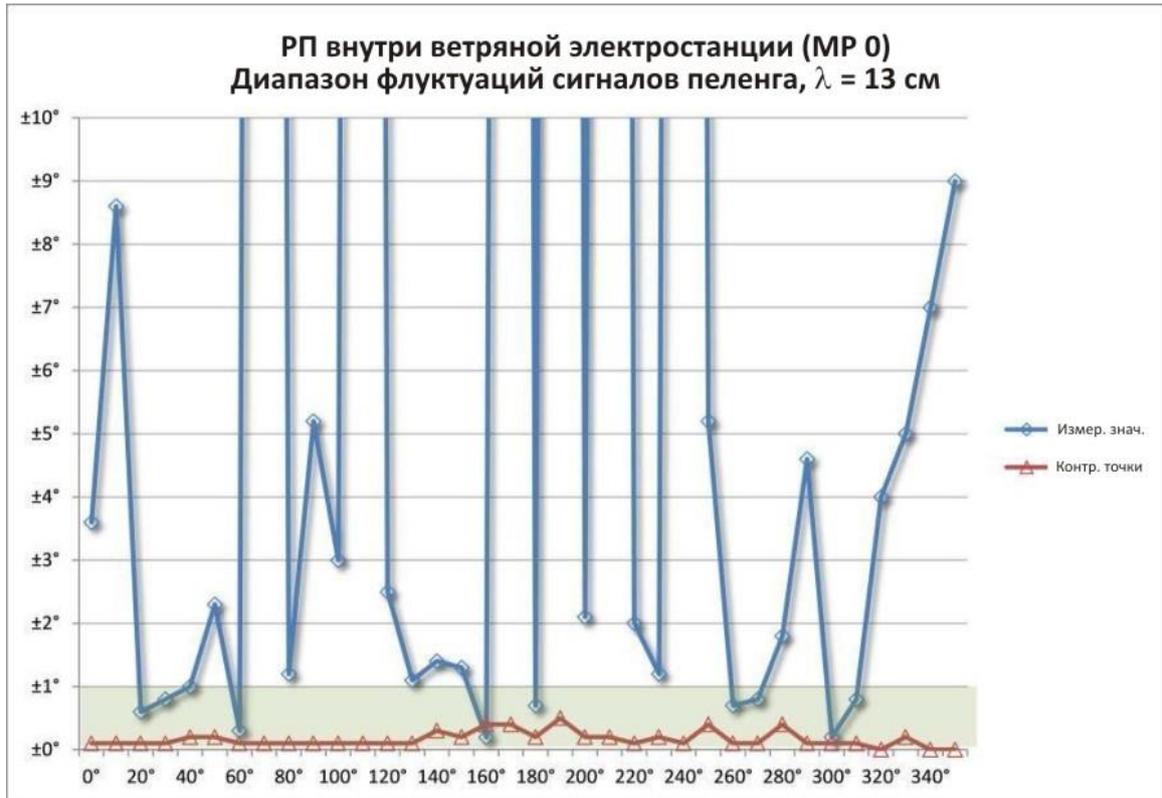


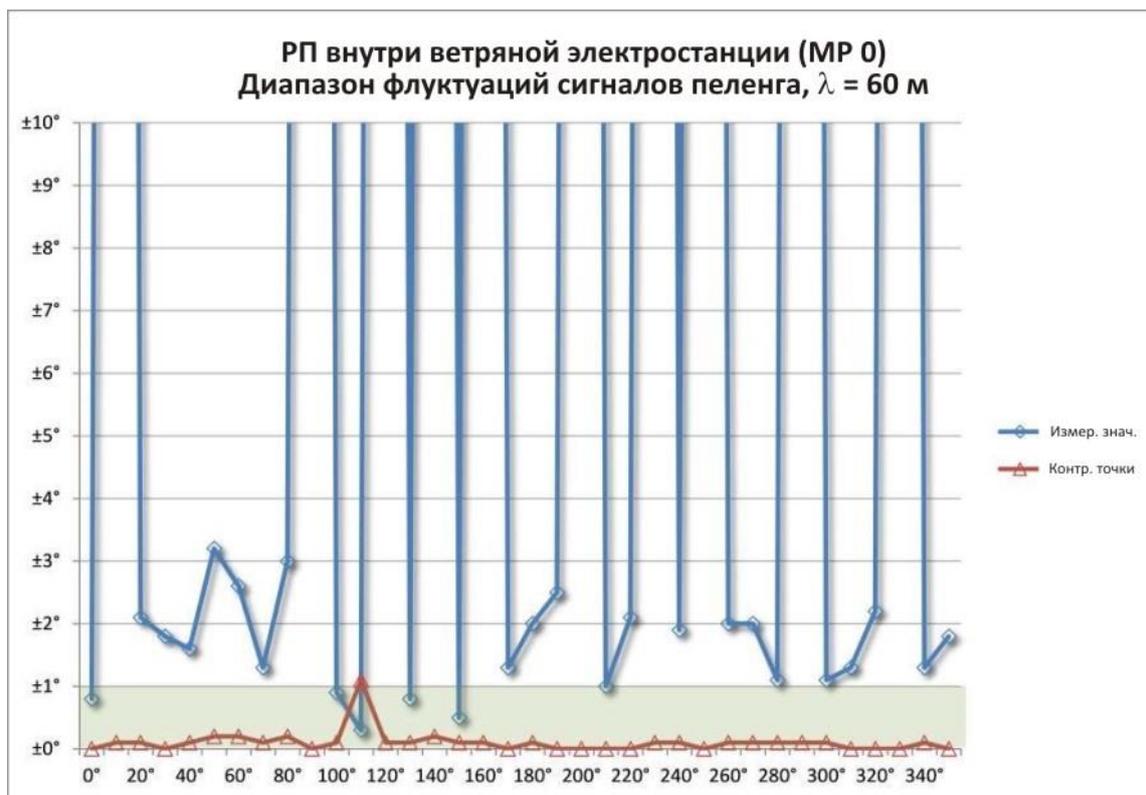












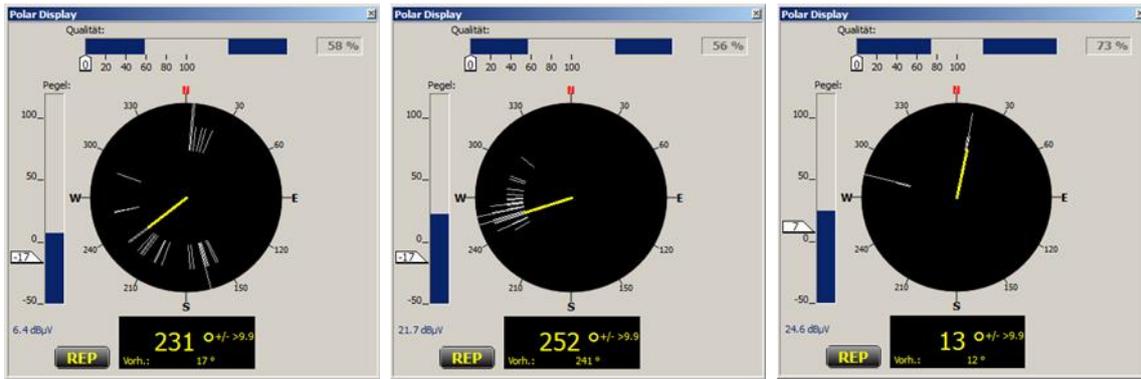
При работе радиопеленгатора на ветряной электростанции значимые ошибки пеленга регистрировались во всех изучаемых полосах частот в диапазонах ОВЧ/УВЧ. Резкое повышение предела флуктуаций сигналов пеленга также наблюдалось при длинах волн менее 70 см, что примерно соответствует полосе частот 800 МГц – 3 ГГц.

В соответствии с физическими характеристиками различных частотных диапазонов в случае длинных волн ошибки могут иметь место во всех лучах, независимо от фактического направления на отдельные мачты. В случае же более коротких волн регистрировались помехи с еще более выраженным влиянием в диапазонах более острых углов. В случае очень коротких волн (диапазон 13 см) существует так много диапазонов с сильными искажениями, что радиопеленгатор становится практически бесполезным по всем направлениям.

В этой связи особенно примечательны диаграммы для диапазона 23 см. Рассматривая отклонение от истинного пеленга, можно заметить всего три относительно узких диапазона углов, в которых пеленг кажется сильно искаженным. Однако при более близком рассмотрении диапазона флуктуаций становятся заметны чрезвычайно резкие колебания (круговой пеленг) в шести направлениях в радиусе 360°. В тех направлениях, в которых кажущиеся правильными показания пеленга (с небольшим отклонением) совпадают с выраженным диапазоном флуктуаций, на самом деле имеют место случайные правильные результаты, которые не удастся повторить.

Поэтому важно всегда рассматривать обе диаграммы. Пеленг считается действительным только в том случае, если отклонение от истинного пеленга и диапазон флуктуаций находятся в допустимых пределах.

Практическое влияние на работу радиопеленгатора иллюстрируют следующие примеры скриншотов (снимков экрана) индикации пеленгов, полученных в этой точке измерения.

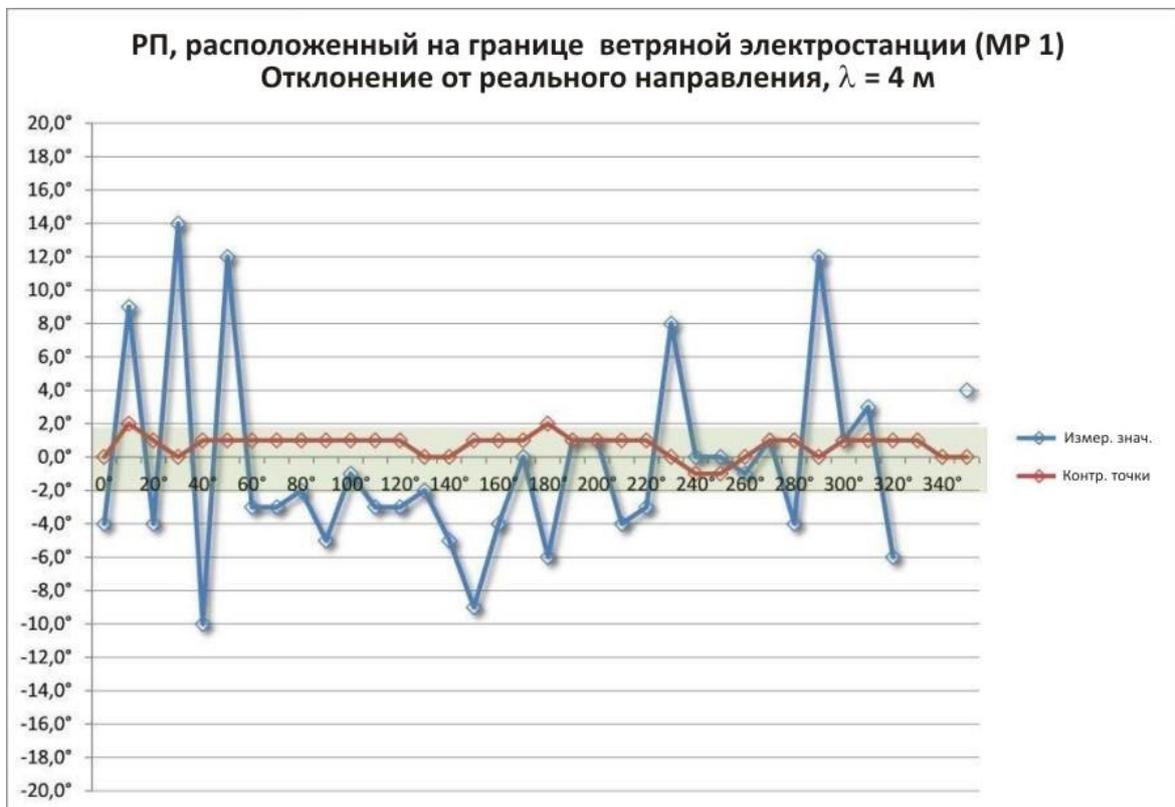


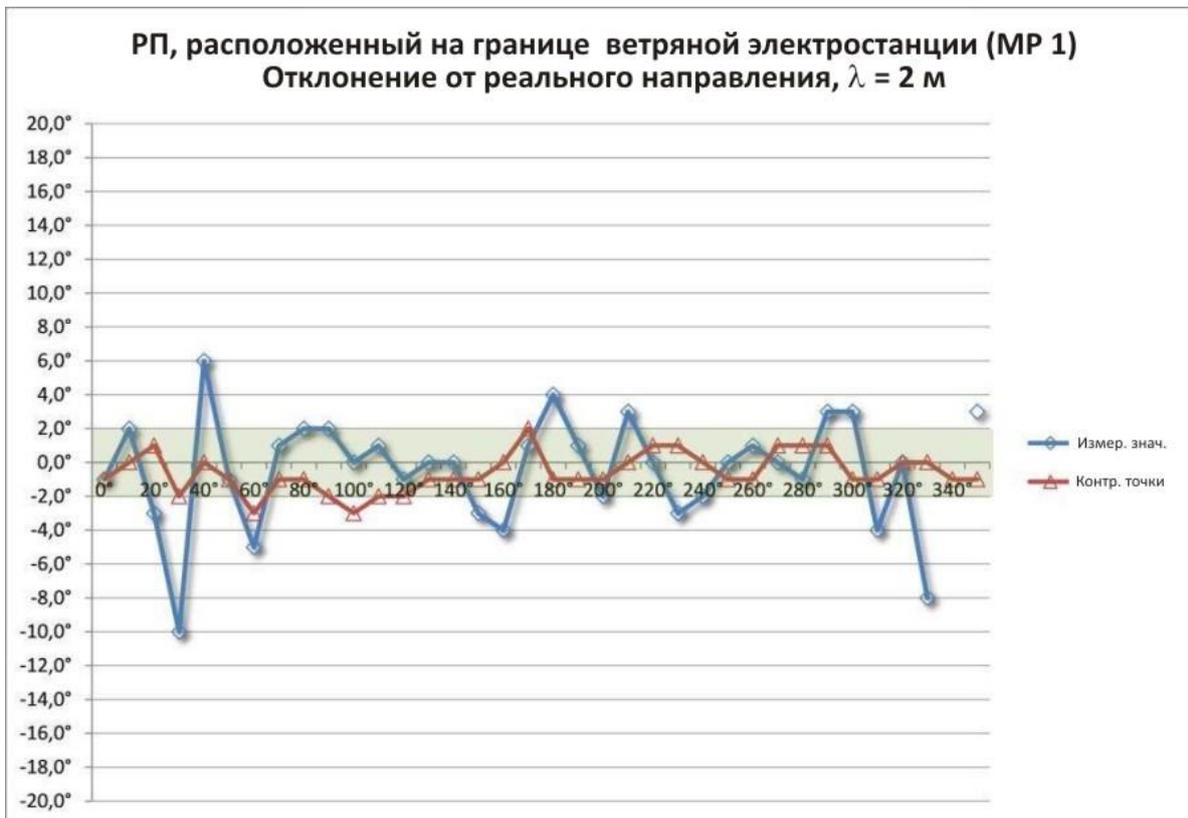
Белые линии показывают историю пеленгации за предыдущие 30 секунд, а желтая линия – пеленг во время скриншота с экрана. В первом примере (диапазон 23 см) пеленг колеблется хаотично почти во всех направлениях; во втором примере (диапазон 13 см) результат пеленгации кажется колеблющимся вокруг среднего значения. В третьем примере (диапазон 30 см) имеются два крайних результата пеленгации, хотя ни один из них не верен!

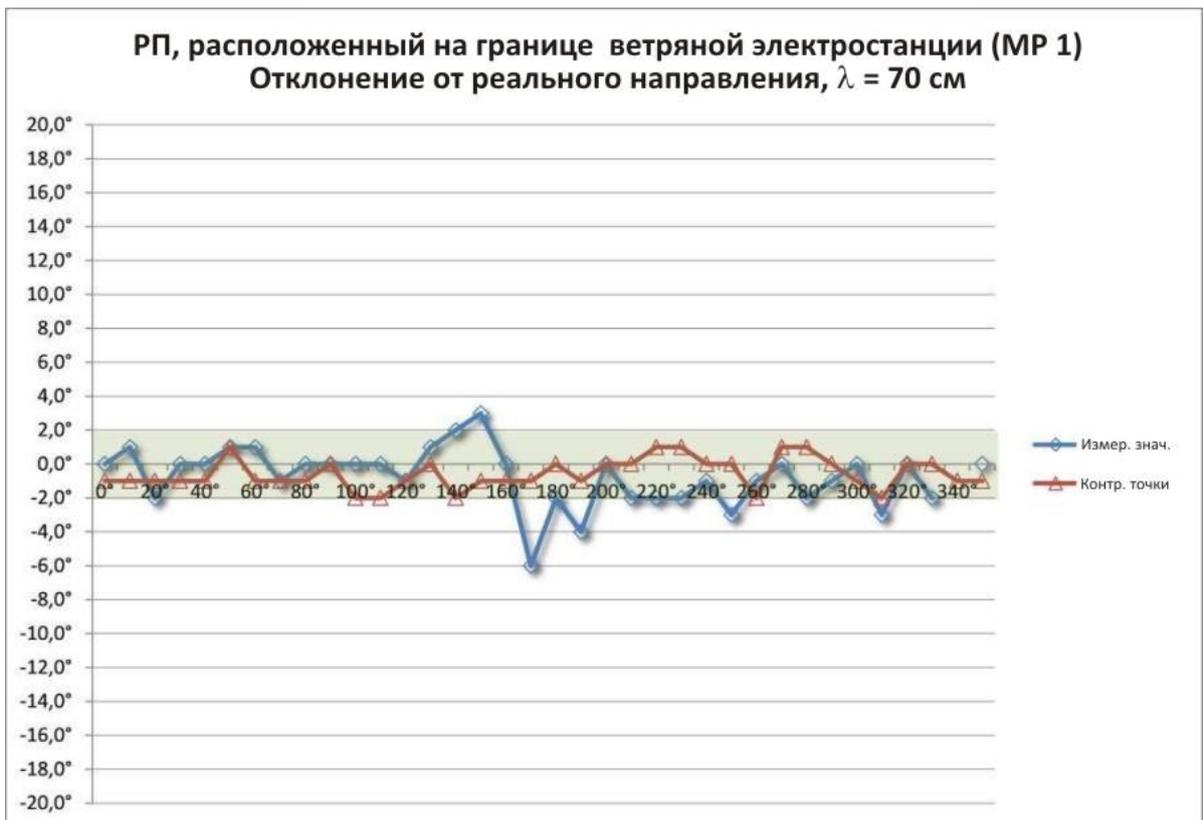
В диапазоне ВЧ радиопеленгатор ведет себя хаотично и поэтому бесполезен.

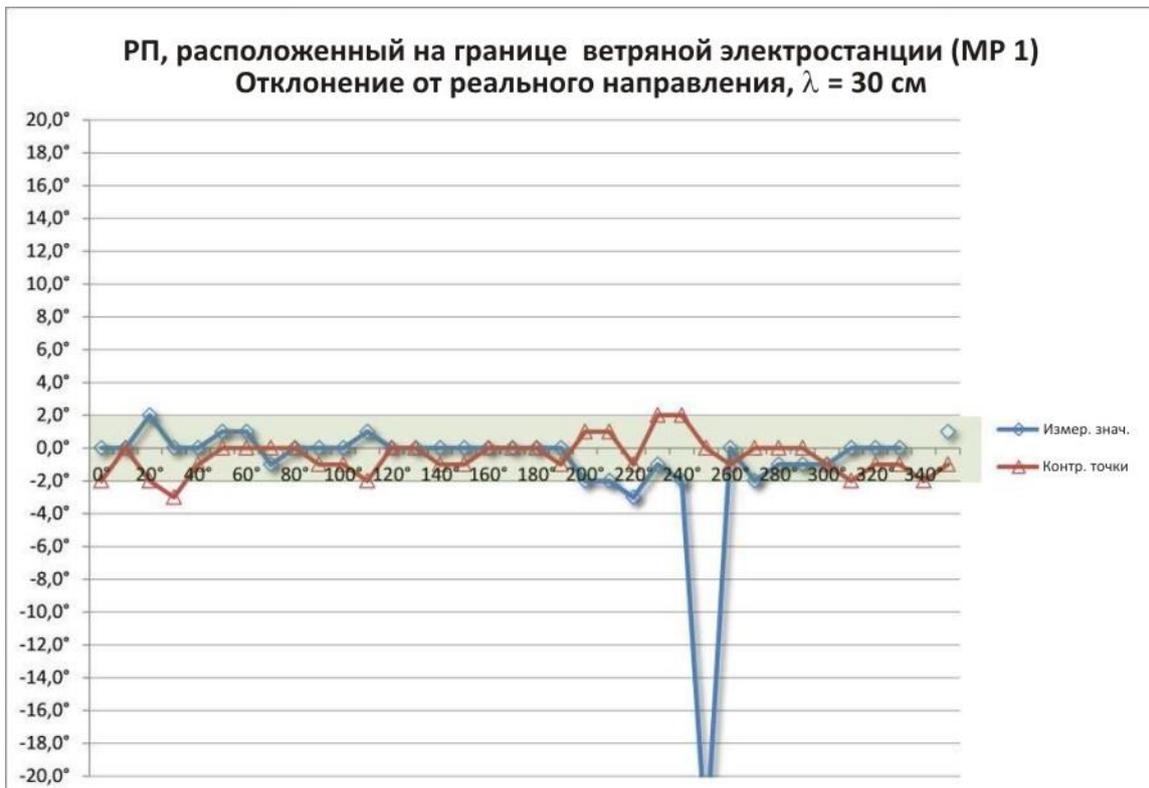
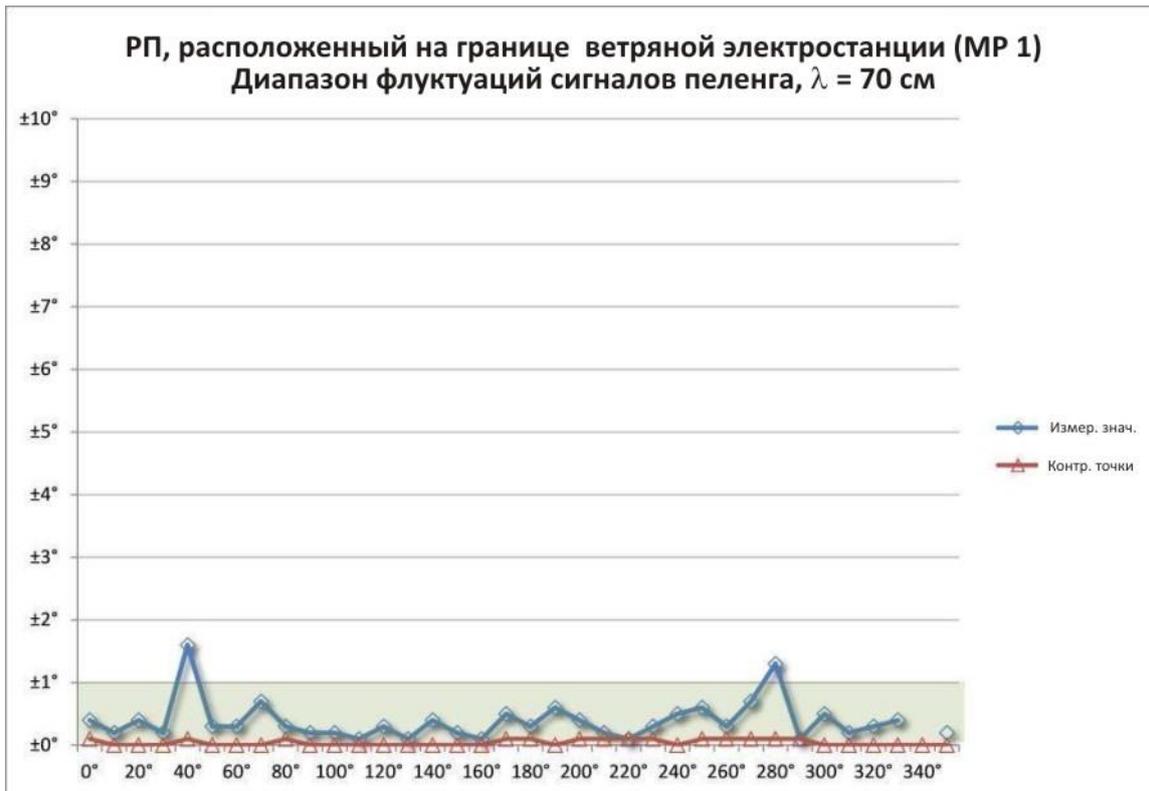
Заключение. Радиопеленгатор не может использоваться внутри ветряной электростанции.

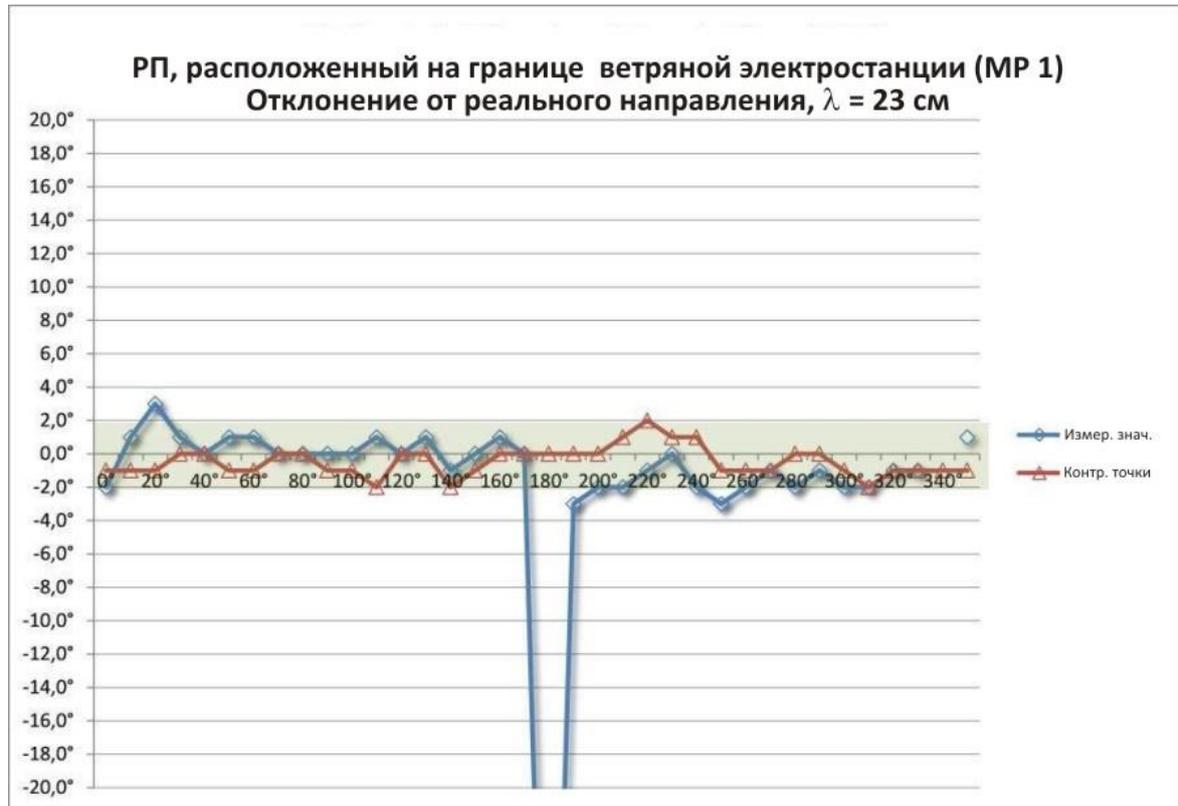
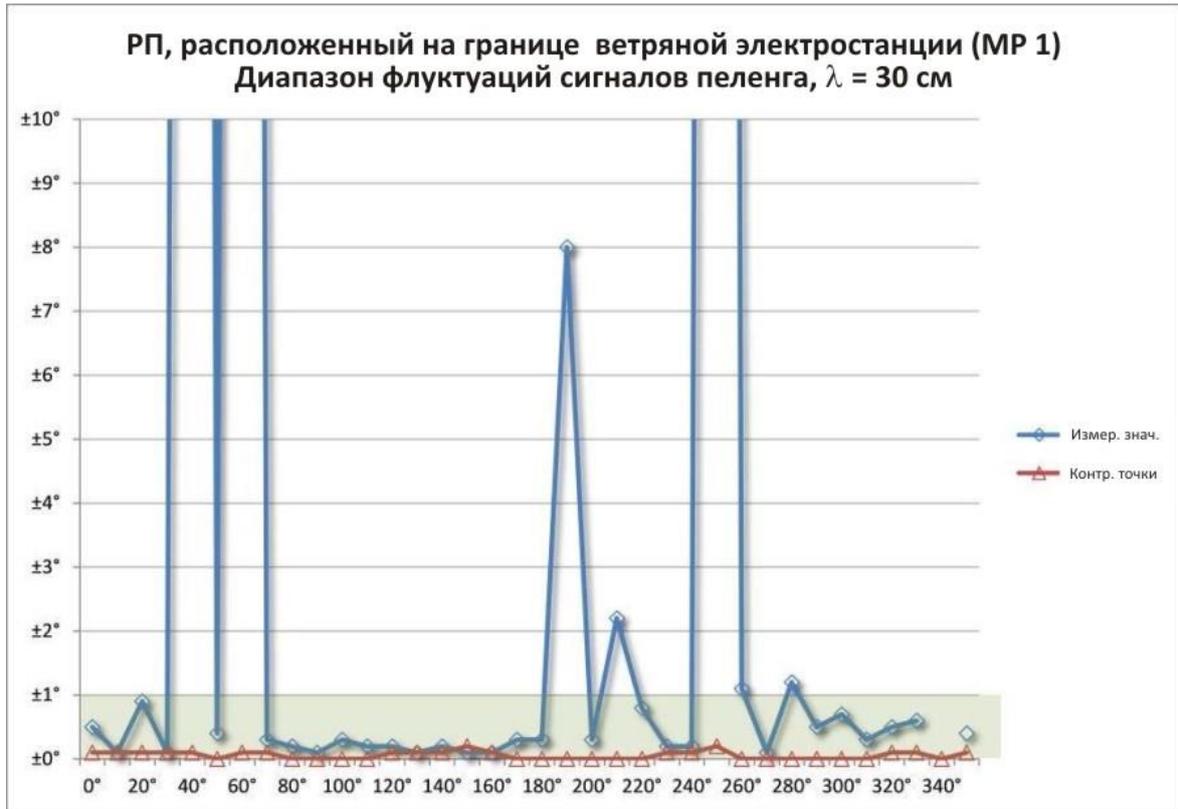
### 9.2.2 Радиопеленгатор (РП), расположенный на границе ветряной электростанции

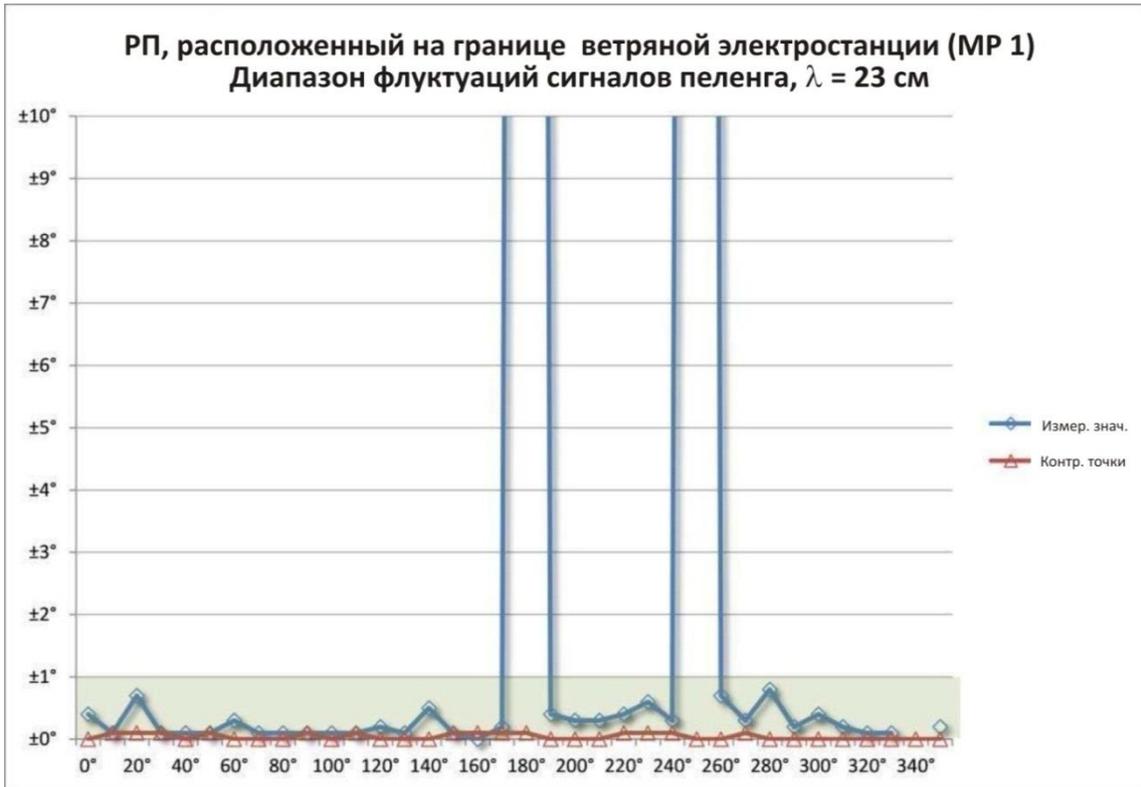


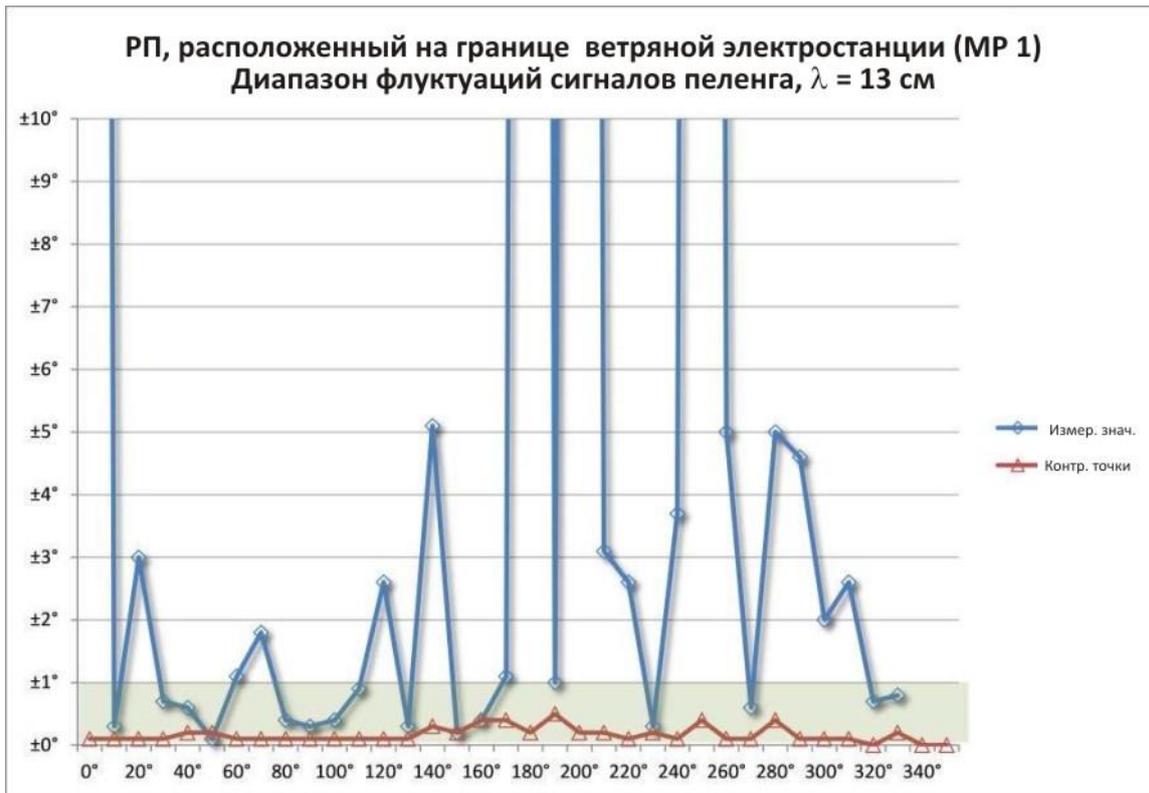












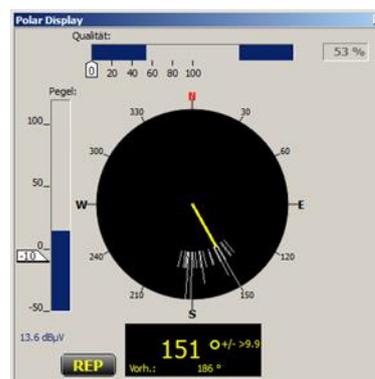
Помехи – в некоторых случаях значительные – регистрировались во всех тестируемых диапазонах частот. Это особенно заметно в диапазоне 4 м, где наблюдались значительные ошибки пеленгации во всех направлениях, причем самые сильные ошибки имели место в случае пеленгации через ветряную электростанцию и, что интересно, в противоположном направлении.

В диапазоне 2 м наиболее выраженные ошибки пеленгации регистрировались в случае пеленгации через ветряную электростанцию и в противоположном направлении. Здесь снова наблюдались заметные колебания значений пеленга со случайным "правильным" пеленгом в направлении 320°.

Диапазон 70 см ведет себя в этой серии измерений относительно хорошо, с соответствующими ошибками пеленгации в направлениях, идущих от ветряной электростанции (на юг)!

Три самых высоких частотных диапазона (800 МГц – 3 ГГц) опять примечательны из-за отмеченных в некоторых случаях колебаний пеленга в ограниченных диапазонах углов. В диапазонах 30 см и 23 см надежный пеленг возможен в больших диапазонах углов. Однако из-за заметных колебаний пеленга в определенных направлениях его в некоторых случаях можно достичь только при длительном наблюдении, что невозможно для большинства цифровых радиосистем.

В диапазоне 13 см пеленг хаотичен и подвержен заметным колебаниям, прежде всего в направлении ветряной электростанции и в противоположном направлении.

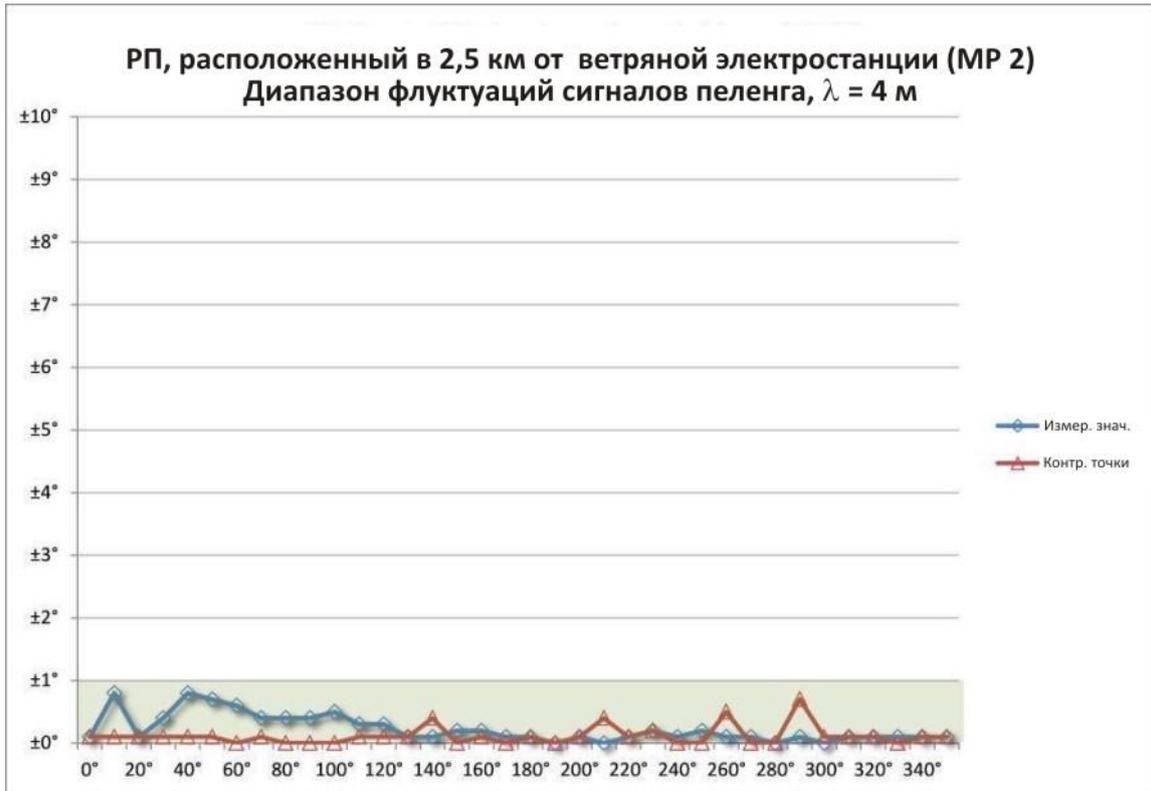


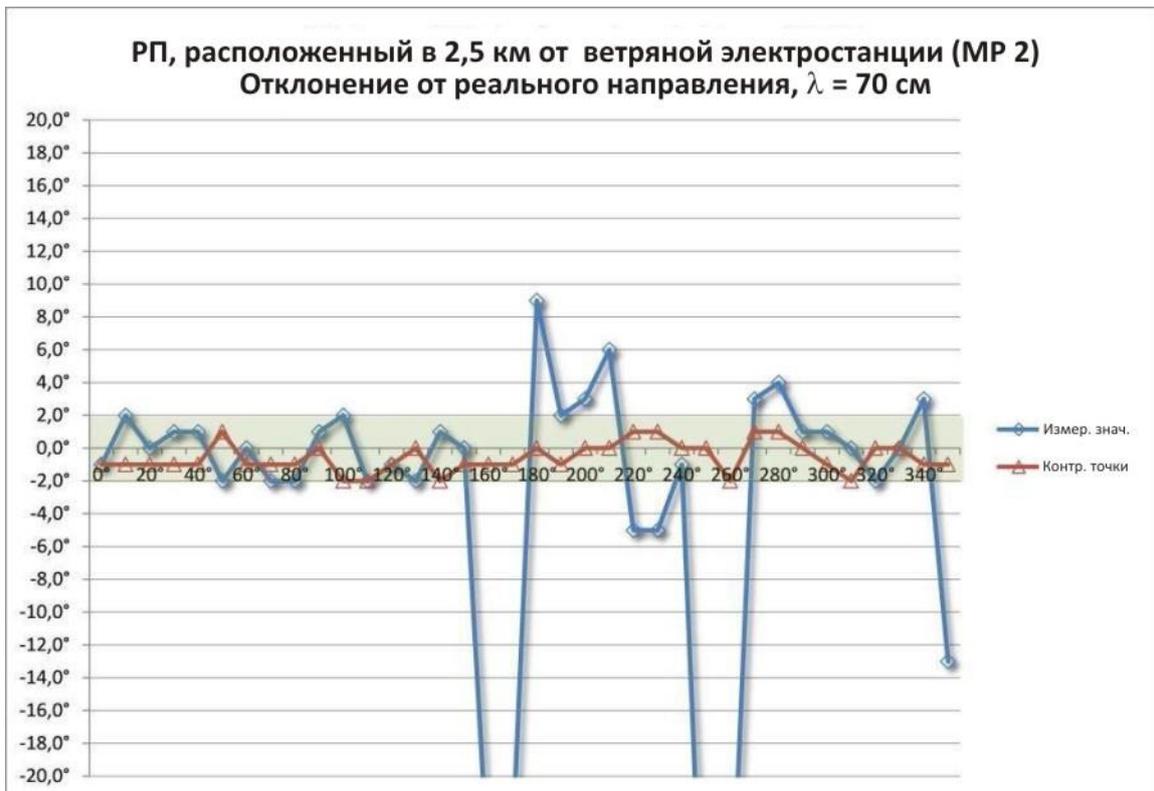
На скриншотах показано два примера типичных показаний пеленга в этой серии измерений. Первый показывает пеленгацию в диапазоне 23 см с несколькими дискретными направлениями пеленга. Короткие белые линии, представляющие историю пеленга, указывают на то, что радиопеленгатор медленно перемещается между отдельными направлениями пеленга. Второй пример иллюстрирует пеленг в диапазоне 13 см, где показания колеблются вокруг среднего значения.

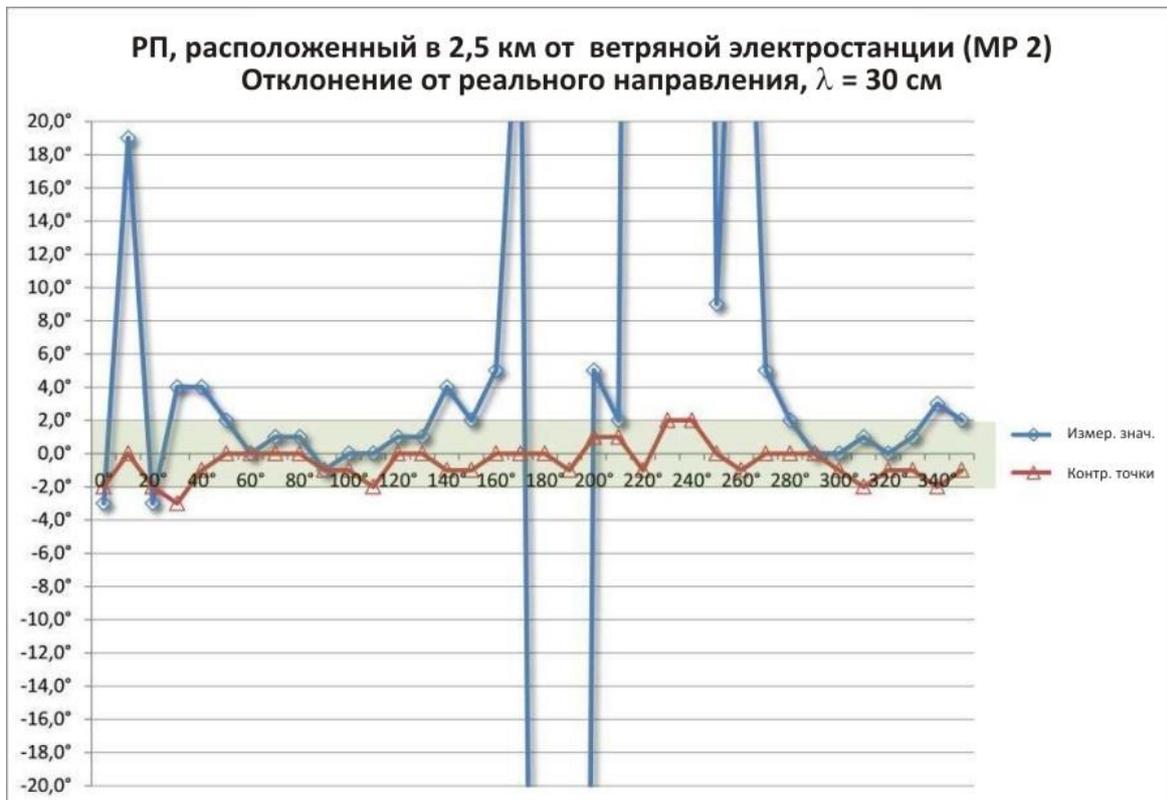
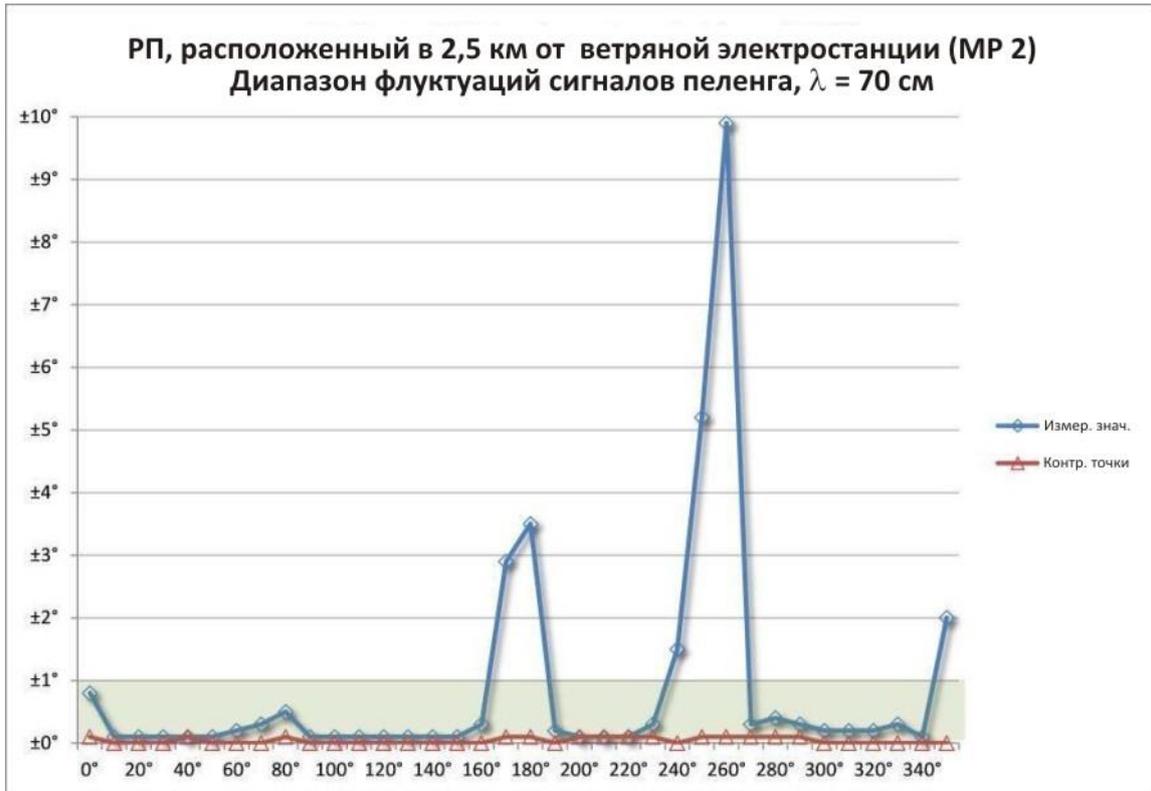
Заключение. В случае расположения на границе ветряной электростанции радиопеленгатор можно использовать только в диапазоне 70 см, и даже тогда лишь в ограниченной степени.

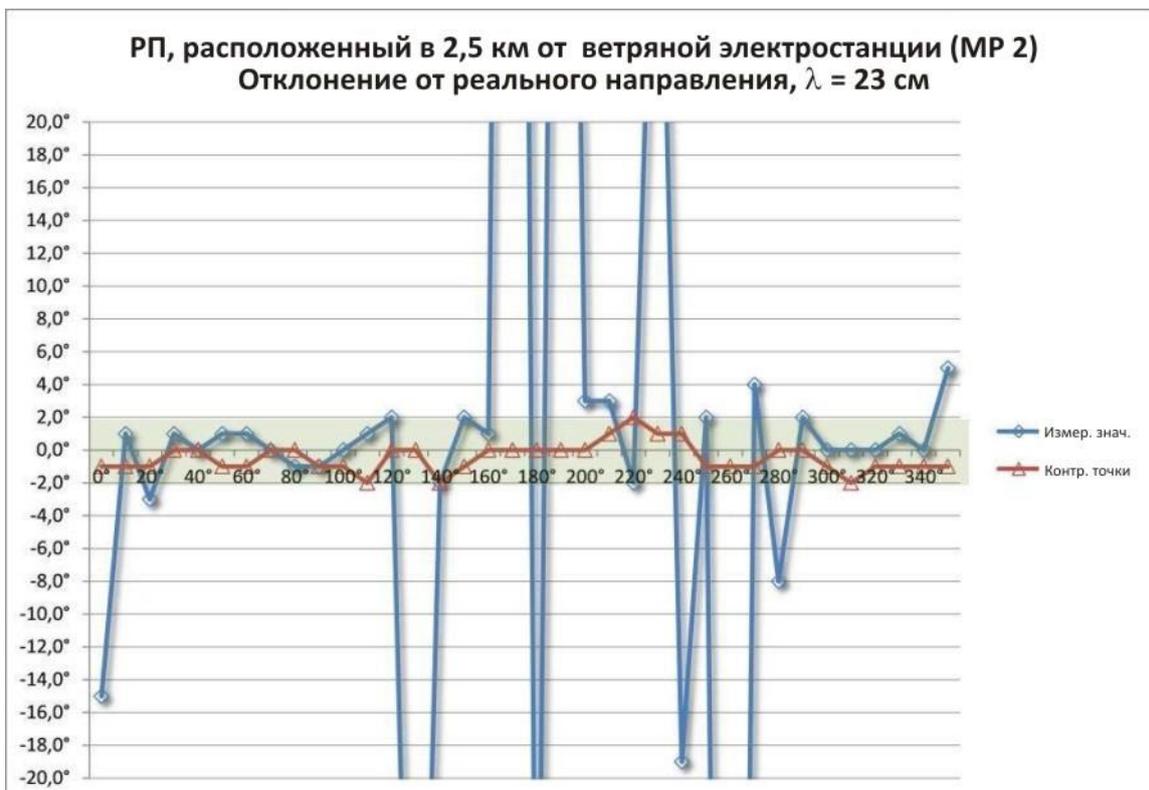
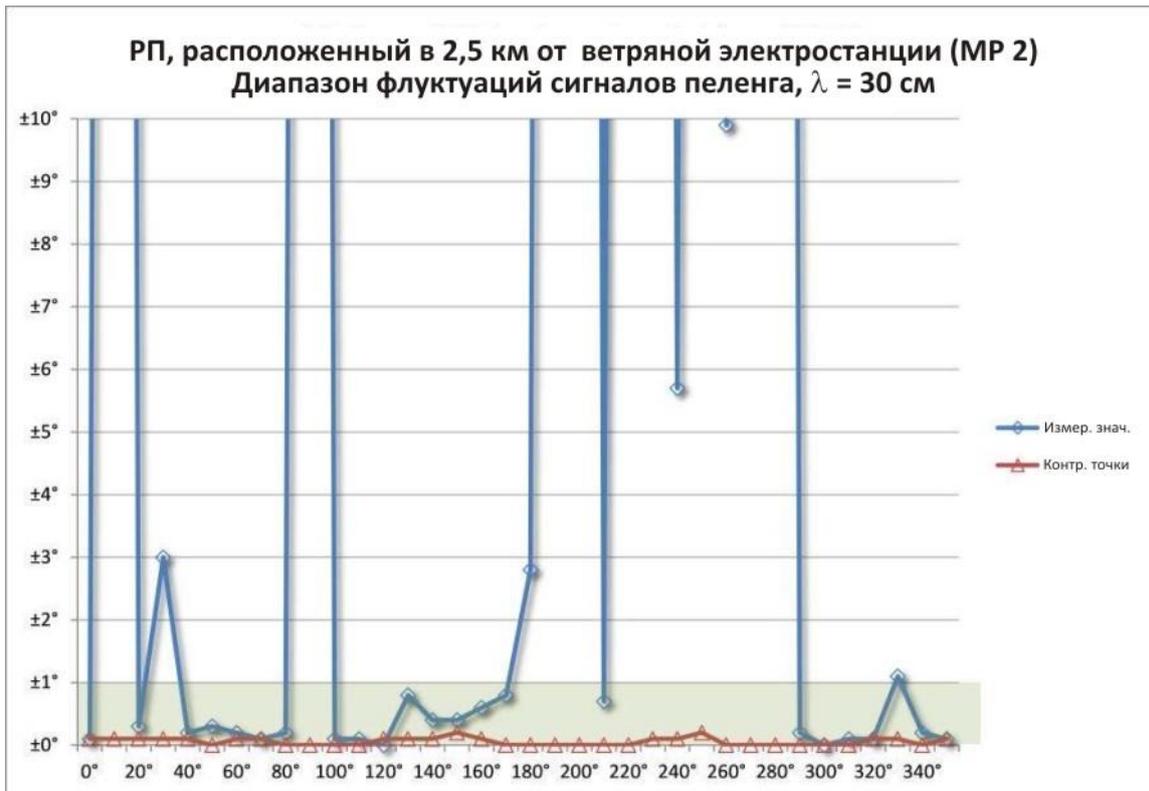
### 9.2.3 Радиопеленгатор (РП), расположенный в 2,5 км от ветряной электростанции

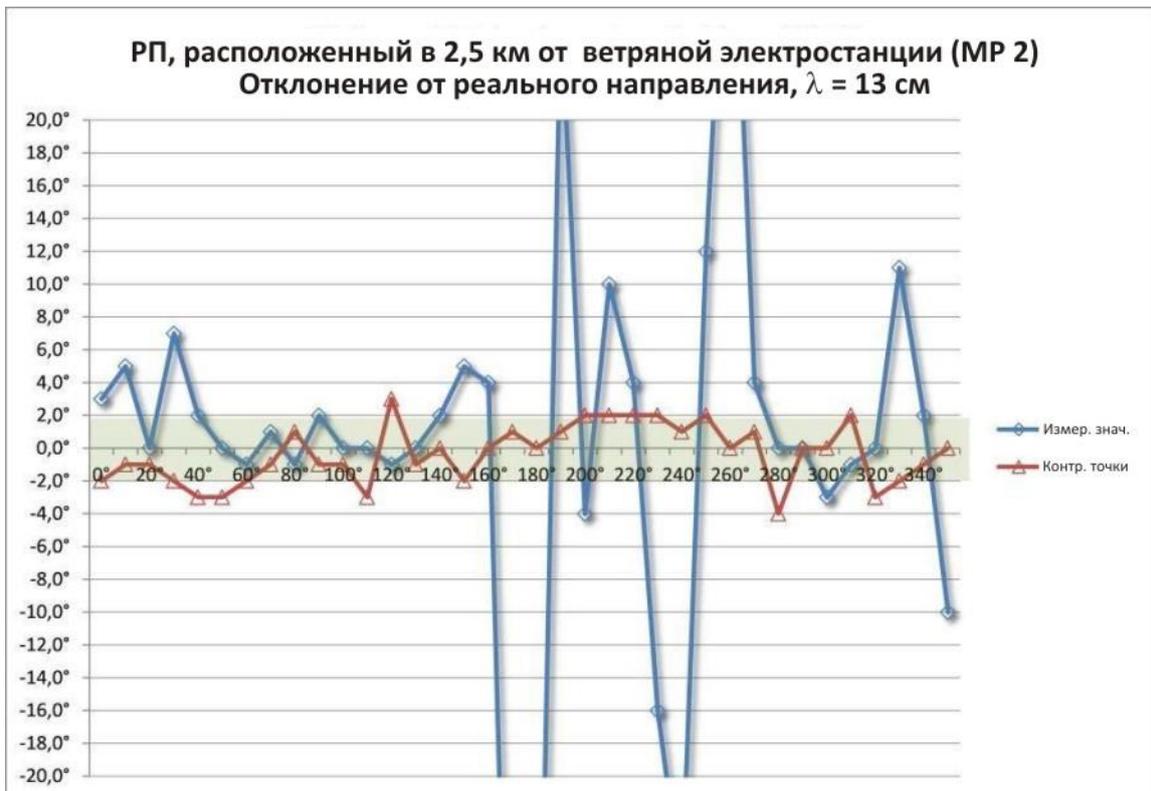
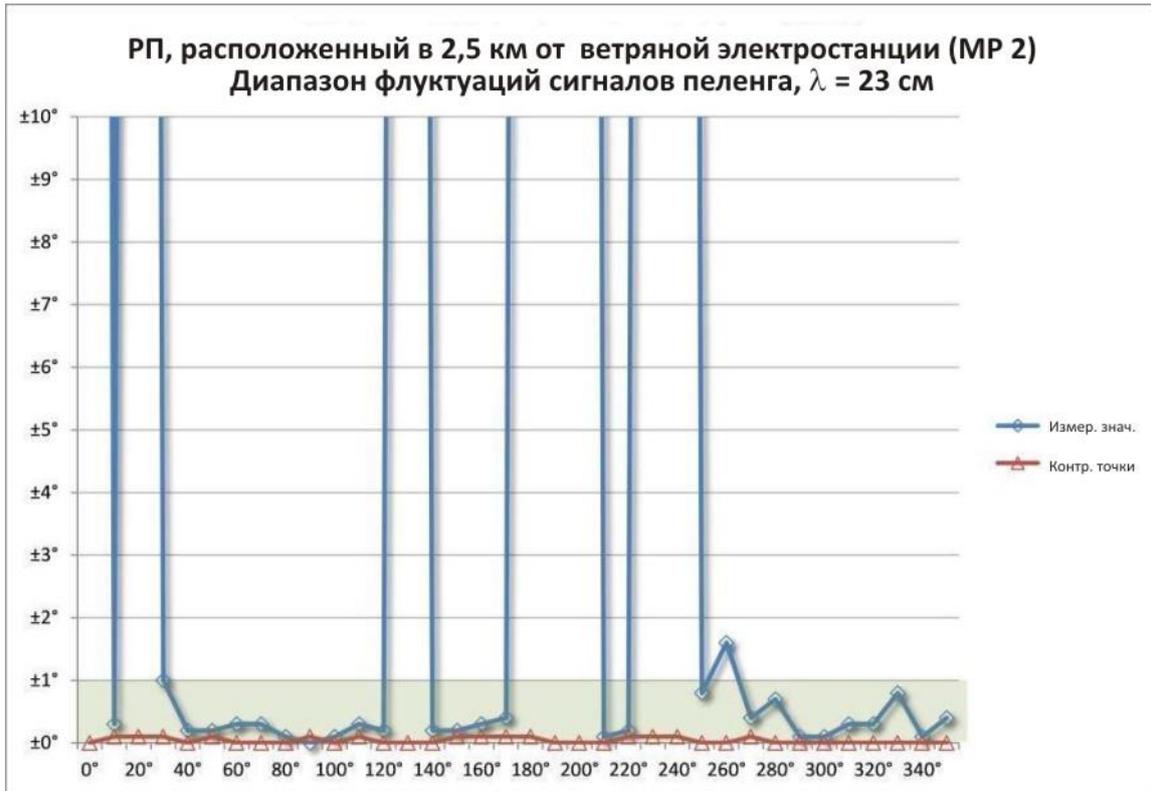


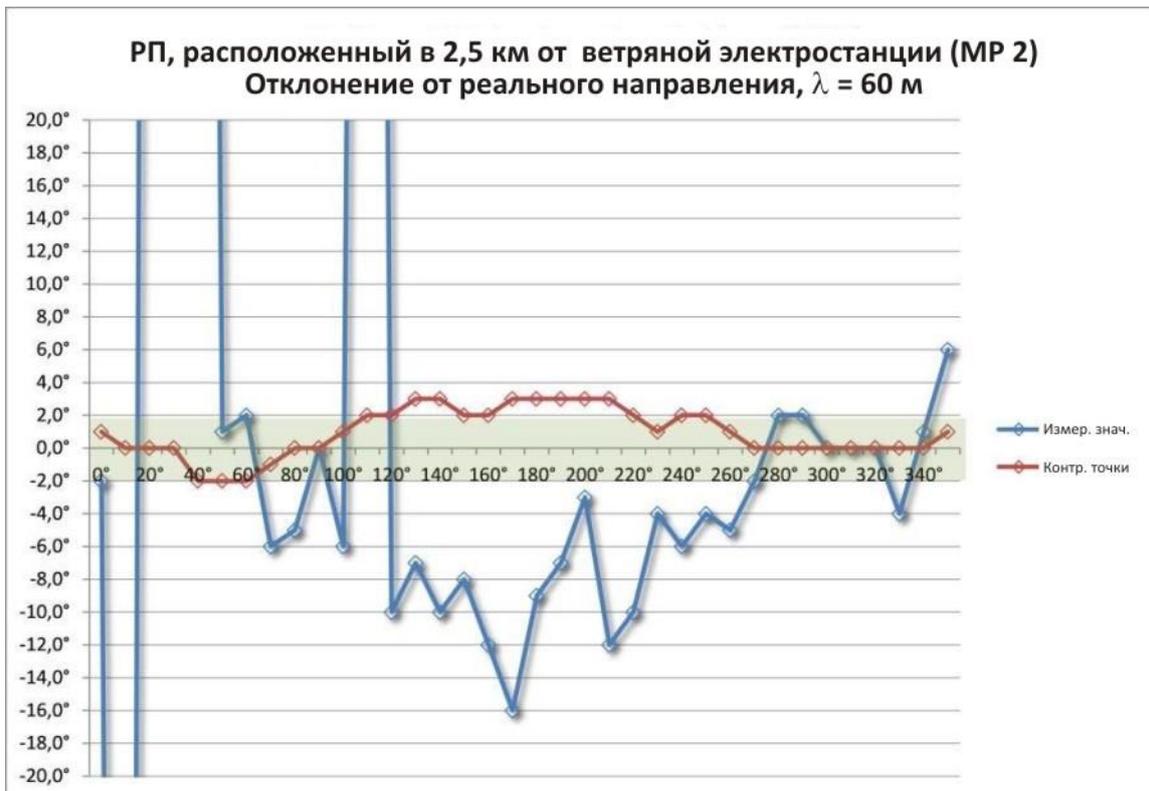


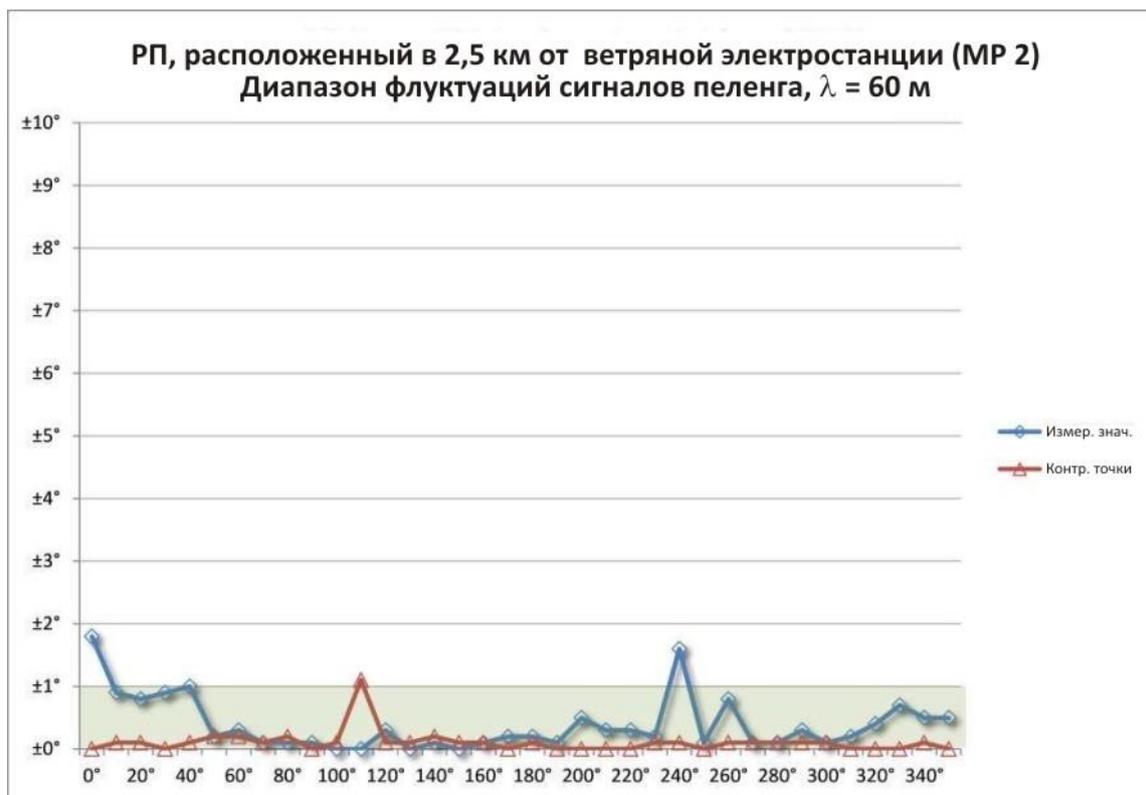












В 2,5 км от ветряной электростанции регистрировались значительные ошибки пеленгации во всех полосах в диапазонах ОВЧ/УВЧ.

В диапазонах 4 м и 2 м наблюдались заметные ошибки пеленгации во всех четырех квадрантах.

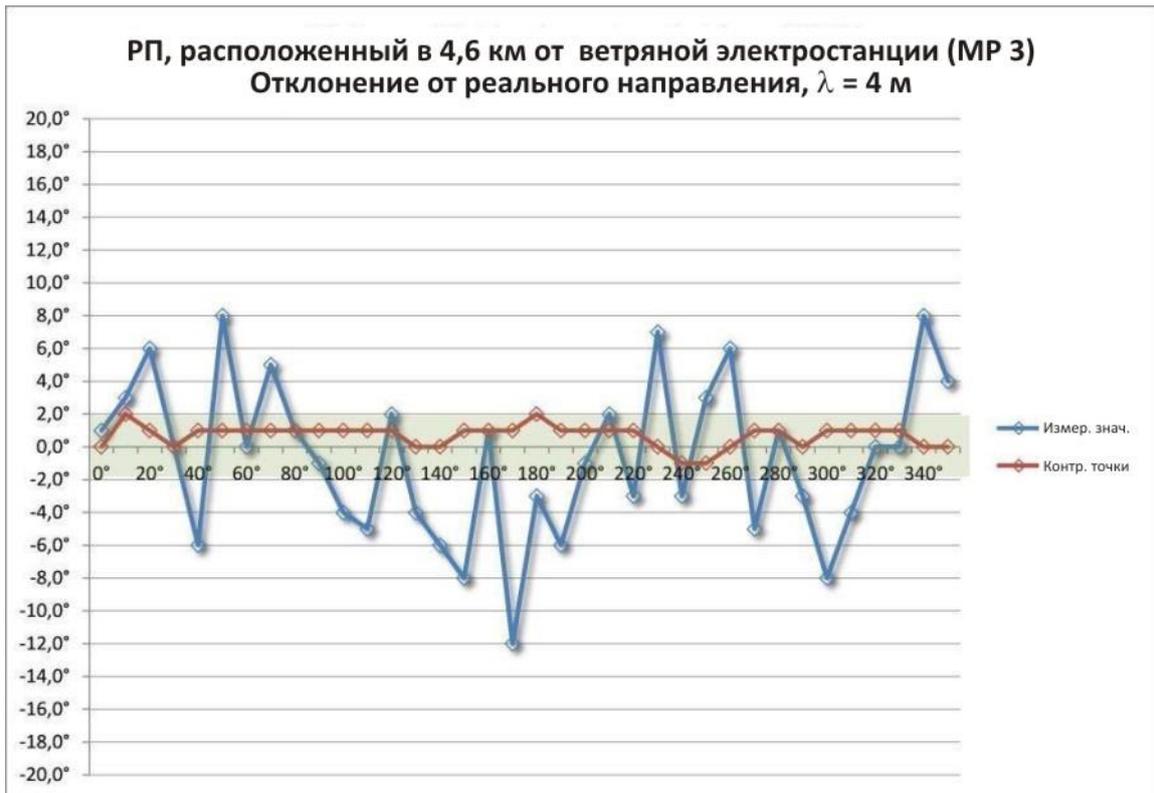
В других диапазонах (70–13 см) были зарегистрированы лишь незначительные ошибки пеленгации в диапазоне углов от северо-востока до юго-востока (то есть примерно в направлении ветряной электростанции). Однако в противоположном направлении наблюдались значительные ошибки. Диапазон углов, в котором наблюдались особенно сильные помехи, образует дугу, длина которой явно коррелирует с длиной дуги, образованной на горизонте ветряной электростанцией с точки зрения радиопеленгатора. Однако диапазон углов, в которых пеленгаторы испытывают помехи, всегда больше дуги, образованной ветряной электростанцией.

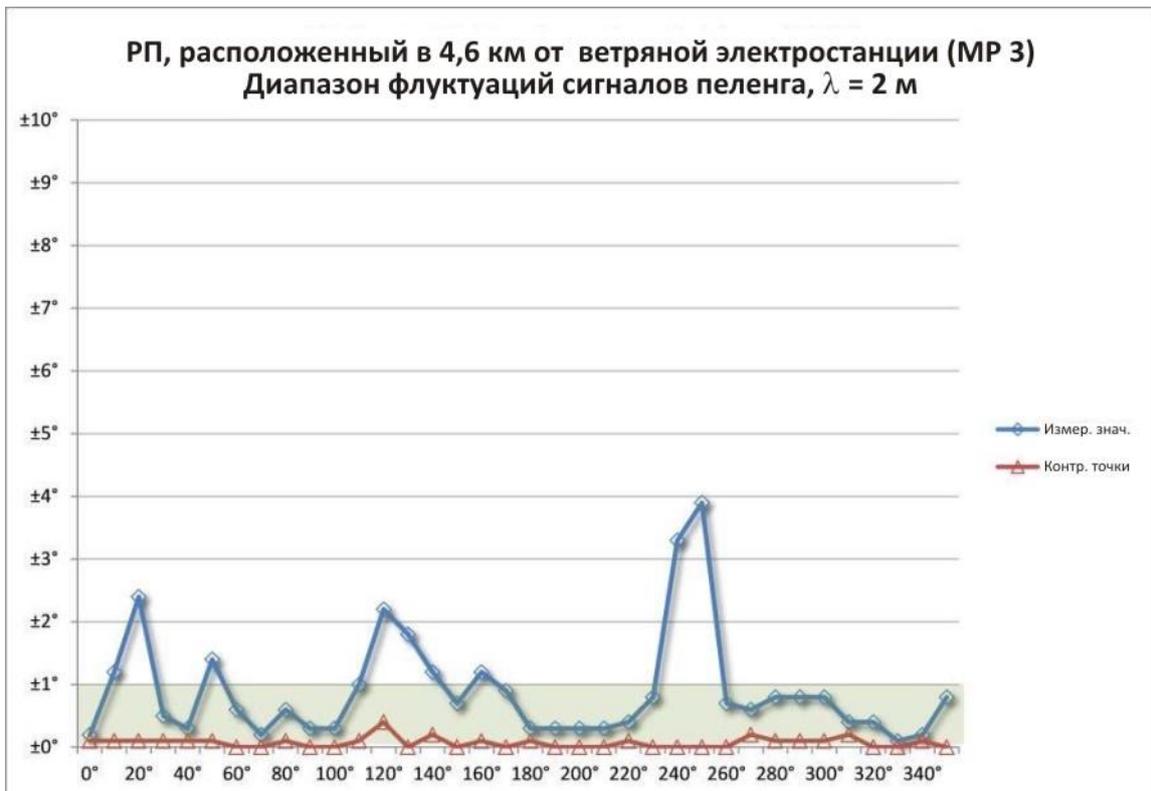
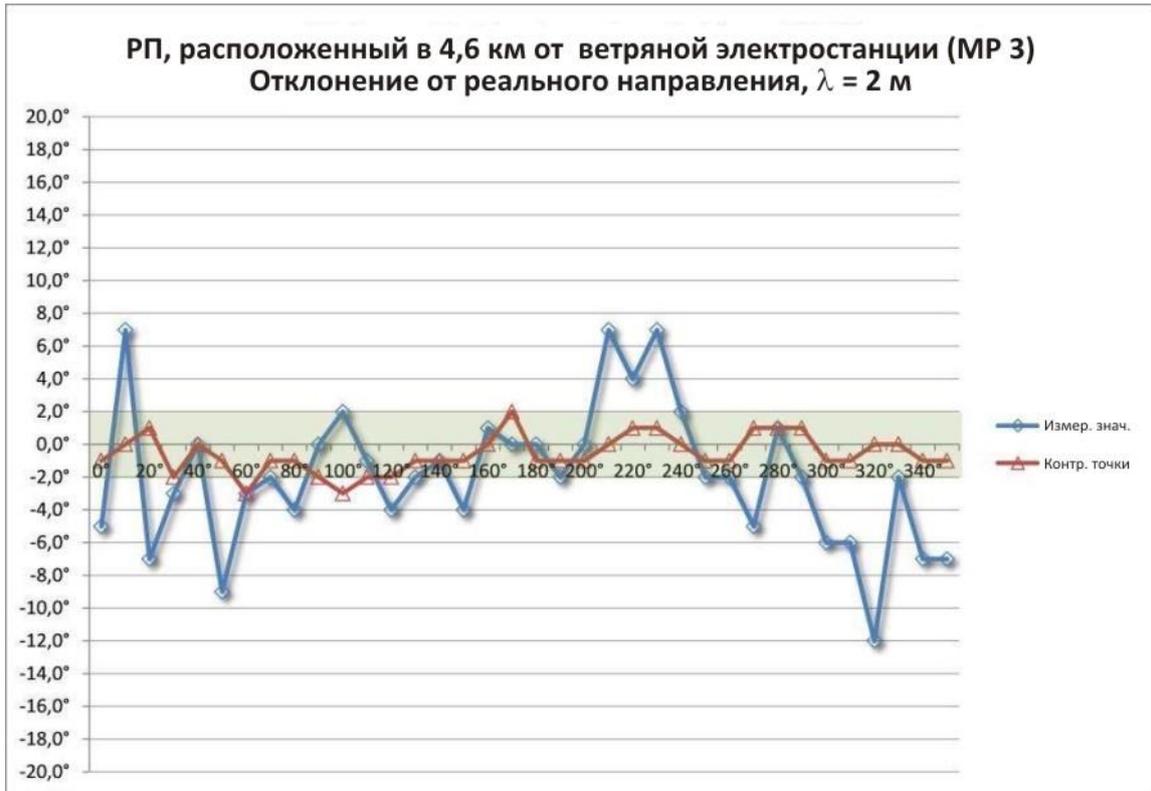
В диапазоне 70 см в дополнение к описанным выше ошибкам пеленга также наблюдались заметные колебания значений пеленга в отдельных диапазонах углов. Этот эффект еще ярче выражен в диапазонах более коротких длин волн (30 см, 23 см и 13 см) и при дальнейшем сокращении длины волны распространяется на все большие диапазоны углов.

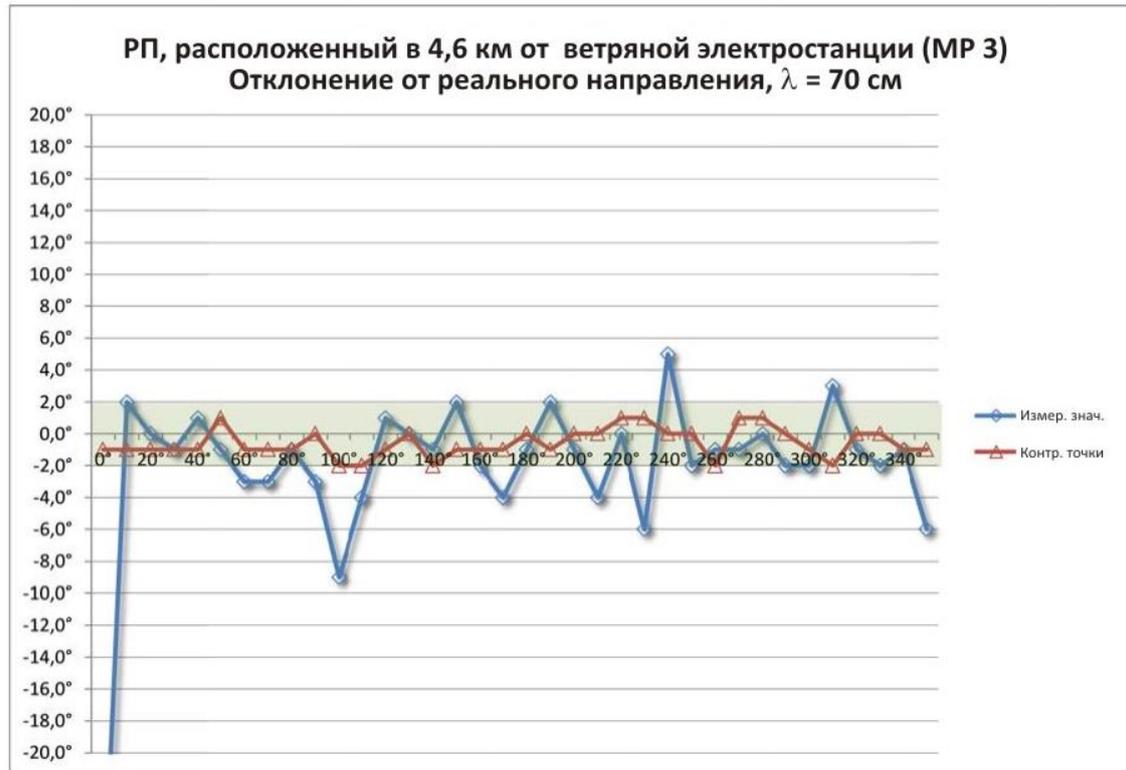
В диапазоне ВЧ значительные ошибки пеленга регистрировались во всех четырех квадрантах, за исключением узкого сектора, поперечного по отношению к ветряной электростанции. В направлении ветряной электростанции ошибки пеленга настолько велики, что невозможно правильно идентифицировать даже квадрант.

**Заключение.** Стационарный радиопеленгатор, расположенный в 2,5 км от ветряной электростанции, может использоваться только в диапазоне 70 см, и даже тогда лишь в пределах ограниченного диапазона углов.

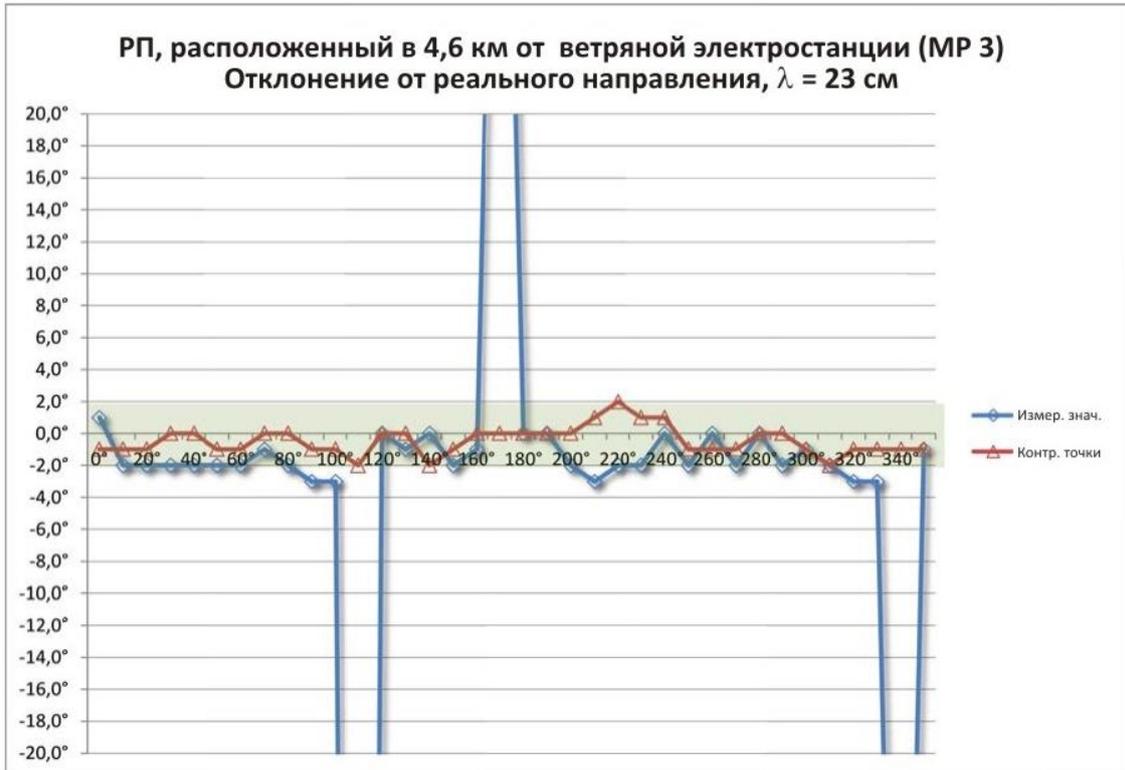
## 9.2.4 Радиопеленгатор (РП), расположенный в 4,6 км от ветряной электростанции



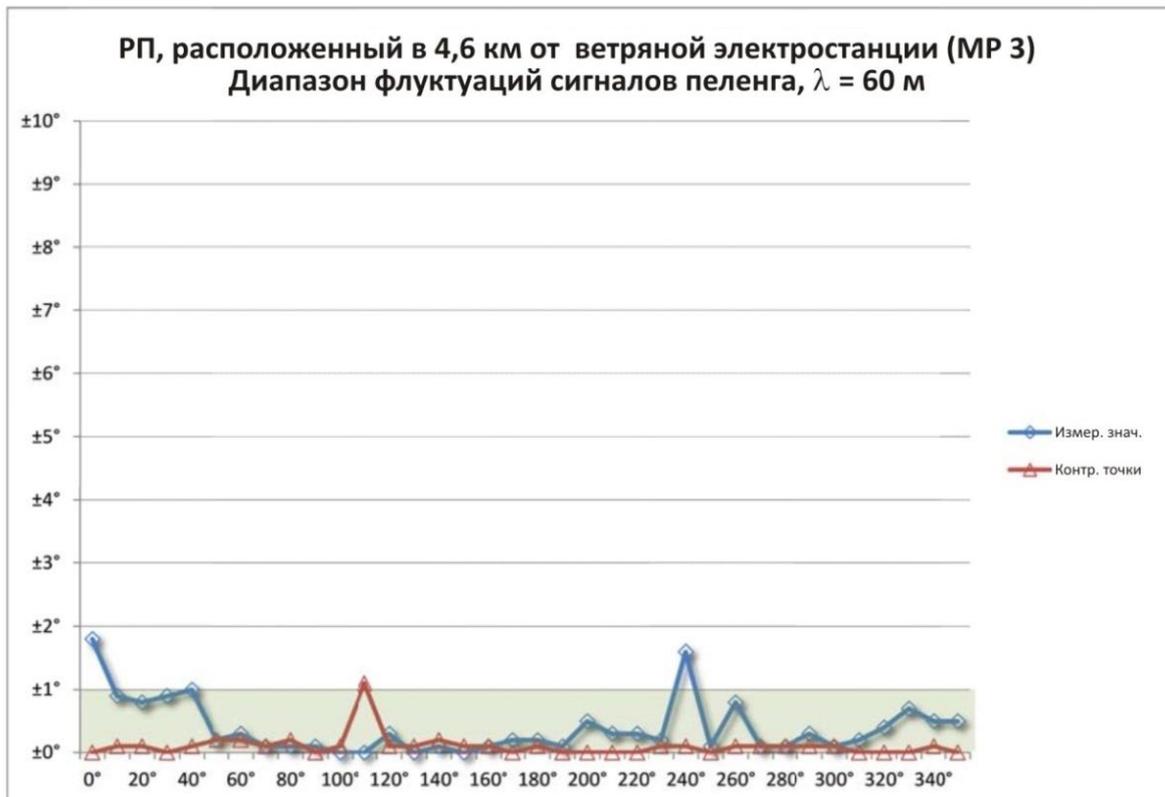












В 4,6 км от ветряной электростанции регистрировались значительные ошибки пеленгации во всех полосах диапазона ОВЧ/УВЧ.

В диапазонах 4 м и 2 м наблюдались заметные ошибки пеленгации во всех четырех квадрантах. В целом они несколько менее выражены, чем при измерениях, выполненных на расстоянии 2,5 км (см. пункт 9.2.3), хотя в диапазоне 4 м в некоторых случаях были зарегистрированы даже более ярко выраженные ошибки пеленгации в направлении от ветряной электростанции.

В диапазоне 70 см особенно заметные ошибки пеленгации, зарегистрированные на расстоянии 2,5 км в направлении, противоположном направлению на ветряную электростанцию, больше не наблюдались. Зато значительные ошибки пеленгации наблюдались во всех четырех квадрантах, за исключением небольшого диапазона углов в направлении ветряной электростанции. Это согласуется с предыдущими наблюдениями, что в результате большего расстояния дуга, образованная ветряной электростанцией, намного короче с точки зрения радиопеленгатора.

В диапазоне 30 см вновь наблюдались весьма заметные ошибки пеленгации в направлении от ветряной электростанции. Однако теперь появились и ярко выраженные ошибки пеленгации в направлении ветряной электростанции. Остались лишь узкие диапазоны углов, поперечных по отношению к ветряной электростанции, с меньшими, но тем не менее заметными ошибками пеленгации.

В диапазоне 23 см имеются два больших диапазона углов, поперечных по отношению к ветряной электростанции, лишь с незначительными ошибками пеленгации. Однако в диапазоне углов  $230^{\circ}$  –  $330^{\circ}$  наблюдались ярко выраженные колебания значений пеленга, что оставило лишь один пригодный для использования сектор в направлении ветряной электростанции.

В диапазоне 13 см наблюдались сильные помехи и хаотичные ошибки пеленгации во всех четырех квадрантах.

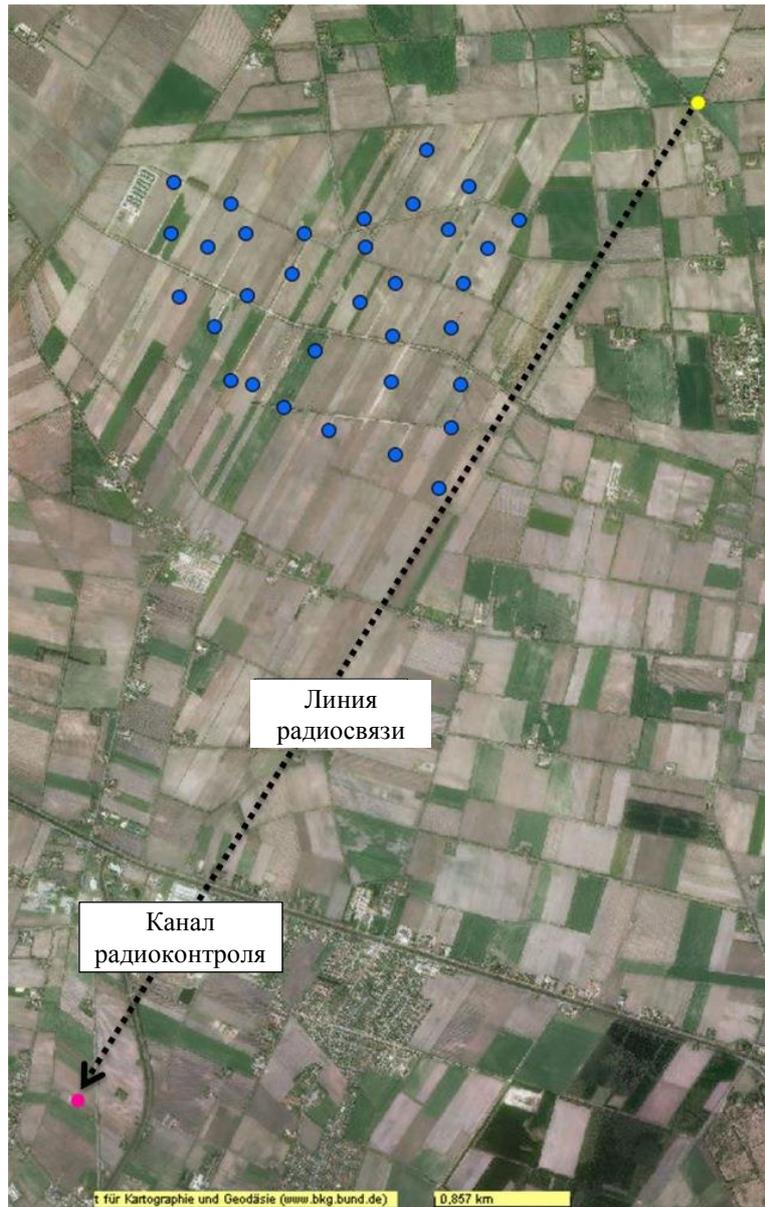
В диапазоне ВЧ на этом расстоянии также были зафиксированы недопустимые ошибки пеленгации как в направлении ветряной электростанции, так и в противоположном направлении. Однако они гораздо меньше выражены, чем те, что наблюдались на расстоянии 2,5 км. Здесь следует обратить внимание на объяснение в пункте 9.1.2, где ставился вопрос о возможности переноса результатов этих измерений на стационарный ВЧ-пеленгатор в отношении ионосферных волн.

**Заключение.** Стационарный радиопеленгатор, расположенный в 4,6 км от ветряной электростанции, не может использоваться ни в одном из указанных диапазонов ОВЧ/УВЧ.

## 10 Измерения уровня сигнала

Чтобы исследовать влияние ветряных турбин на уровень приема сигналов, был создан канал радиоконтроля длиной около 7,5 км по касательной к юго-восточной границе ветряной электростанции в Харене. Цель исследования – выявить любые колебания уровня в месте нахождения радиопеленгатора и определить их прямую причинную связь с окружающими ветряными турбинами.

Канал радиоконтроля с указанием местоположения радиопеленгатора (красная точка) и передатчика (желтая точка)



**Расположение передатчика для измерения уровня сигнала**

Ветряная турбина лучше всего работает, когда частота вращения ротора согласована со скоростью ветра. В условиях работы с частичной нагрузкой (регулирование крутящего момента) угол наклона лопастей и коэффициент окружной скорости оптимизированы таким образом, что частота вращения ротора примерно пропорциональна скорости ветра. Современные трехлопастные турбины работают в эффективном диапазоне частот вращения от 5 до 32 оборотов в минуту. Измерения частоты вращения ротора, выполненные во время измерений уровня сигнала на ветряной электростанции в Харене, показали переменное время полного оборота от 5,1 до 6,5 секунды.

**10.1 Чувствительность системы**

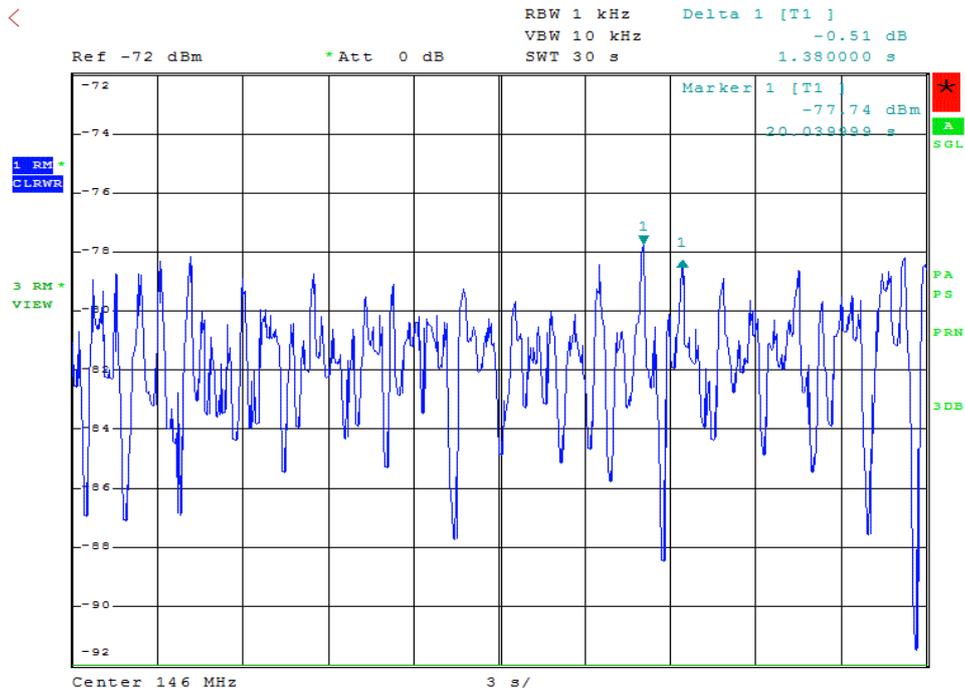
Чувствительность используемой приемной системы, состоящей из анализатора спектра и вертикальной антенны с дополнительными горизонтальными отражающими элементами в нижней части, настроенной на соответствующий частотный диапазон, превышает  $-134$  дБм для всех рассматриваемых частот.

**10.2 Регистрация во временной области**

Чтобы получить первоначальный обзор флуктуаций уровня сигнала, на первом этапе уровни регистрировались во всех частотных диапазонах в течение трех секунд во временной области (нулевой диапазон измерения). В качестве тестового сигнала использовался сигнал N0N (немодулированный непрерывный сигнал несущей при непрерывной мощности передатчика с незатухающими колебаниями).

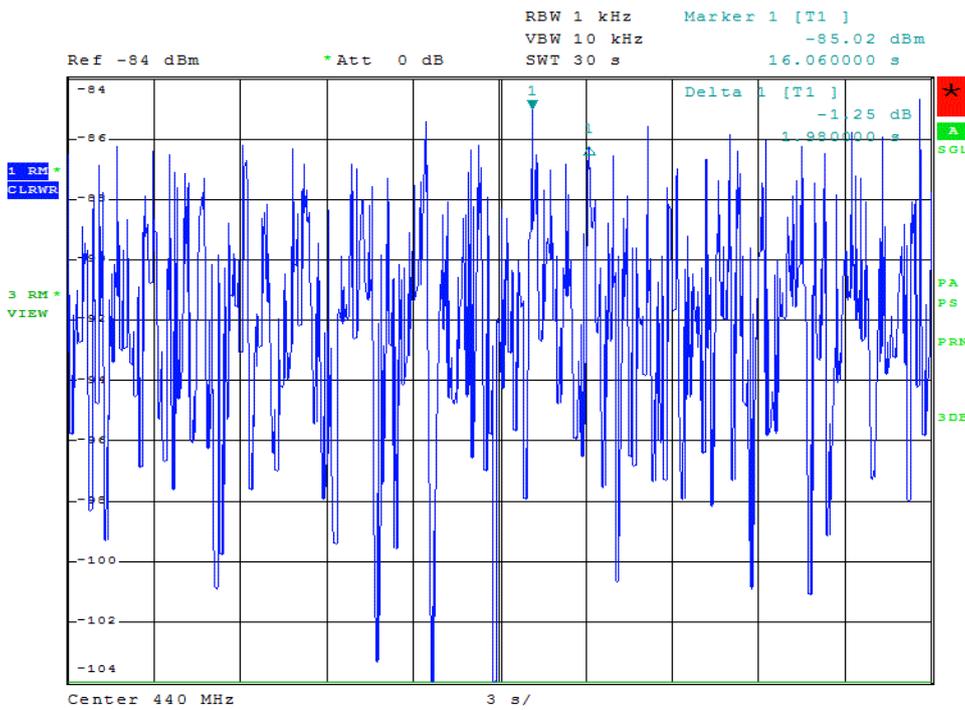
Во всех последующих записях измерений синяя кривая соответствует уровню принятого сигнала, а зеленая – чувствительности системы. В некоторых случаях принятый сигнал находится столь далеко от воздействия шума, что зеленая кривая, показывающая минимальный уровень шума, становится невидимой.

Диапазон 2 м



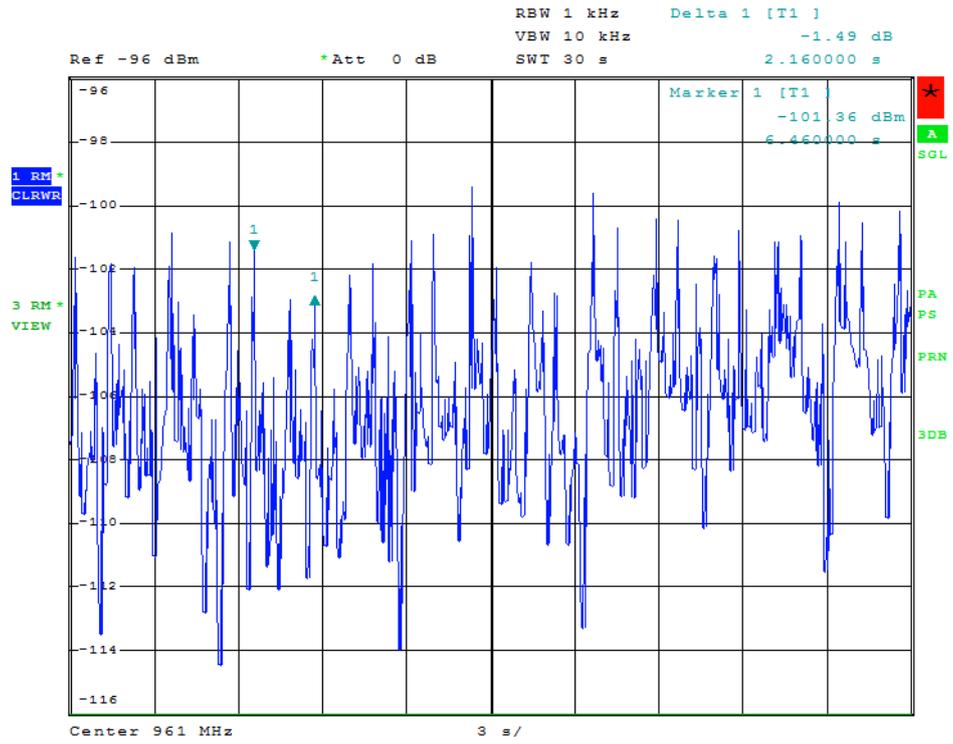
Date: 8.FEB.2015 17:07:29

Диапазон 70 см



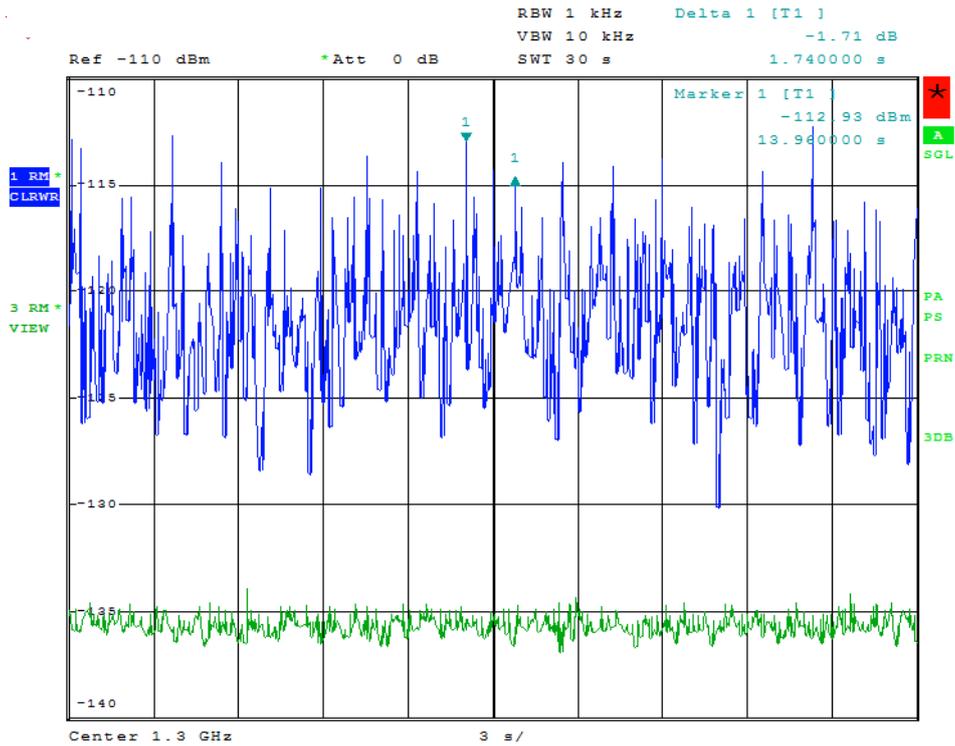
Date: 8.FEB.2015 16:45:42

Диапазон 30 см



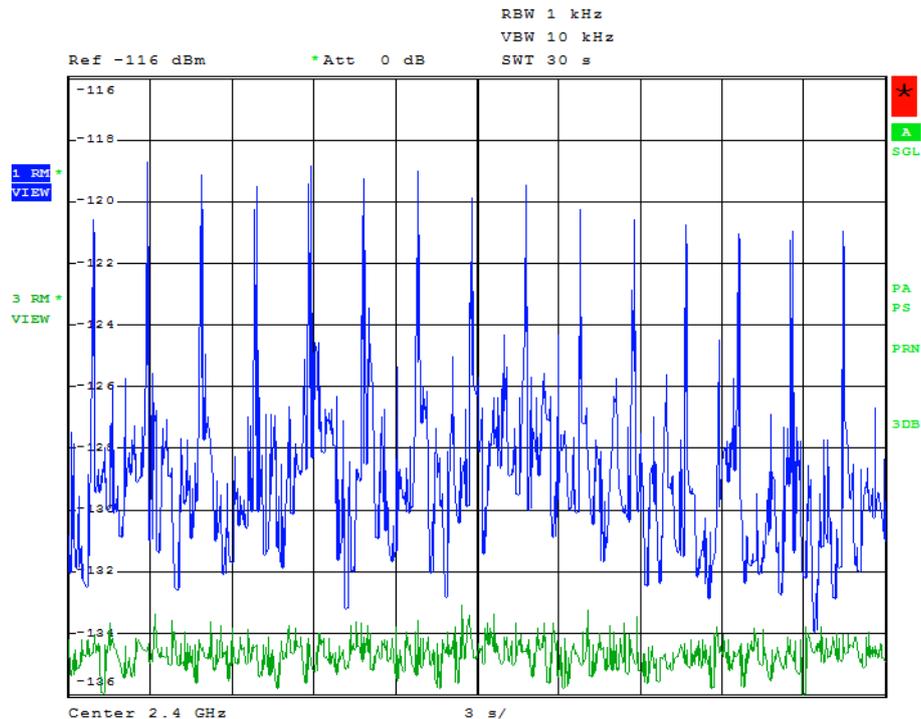
Date: 8.FEB.2015 16:24:49

Диапазон 23 см



Date: 8.FEB.2015 15:57:12

## Диапазон 13 см



Date: 8.FEB.2015 15:26:16

Понятно, что происходит не только повышение и понижение уровней через регулярные интервалы времени, но и возникают эффекты наложения в результате наличия ряда различных интерференционных переменных. Конкретное изменение уровней также, по-видимому, сильно зависит от длины волны радиосигнала.

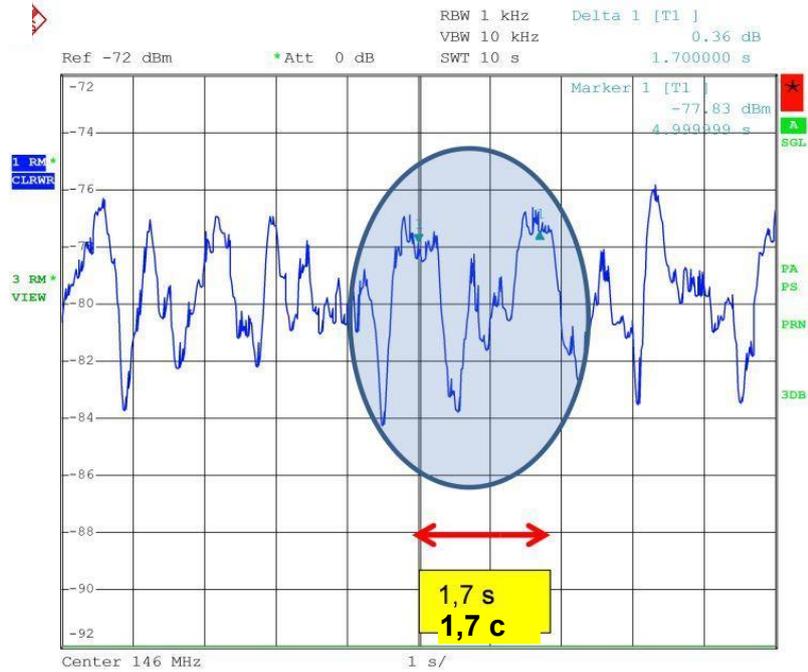
При измерении расстояния между отдельными пиками уровня результирующая разница во времени составляет от 1,7 до 2,16 секунды, что соответствует периоду вращения (времени оборота) ротора от 5,1 до 6,48 секунды (для трехлопастных турбин). Эти измеренные значения соответствуют чисто визуальным измерениям периода вращения ротора от 5,1 до 6,5 секунды, производимым во время записи измеренных значений. Это говорит о том, что за данные повышения и падения уровня отвечают отдельные лопасти роторов 29 ветряных турбин. В зависимости от длины волны совокупное влияние нескольких лопастей ротора приводит к тому, что уровни колеблются почти хаотично и затрудняют привязку колебаний уровня к отдельным лопастям. Особенно выдающиеся точки на шкале времени отмечены треугольниками.

Разность между максимальным и минимальным уровнями, в данном случае измеренная с помощью среднеквадратичного детектора, достигает 20 дБ.

### 10.3 Анализ уровня сигнала

При более коротком времени записи, составляющем  $\leq 1$  секунда, подтверждается, что отдельные повторяющиеся пиковые уровни могут быть сгруппированы и отнесены к одной и той же причине.

Диапазон 2 м



Date: 8.FEB.2015 17:09:54

Результаты измерений с более высокими скоростями показывают, что колебания уровня доходят до 40 дБ. С практической точки зрения это означает взаимное уничтожение.

Диапазон 70 см



Date: 8.FEB.2015 16:49:52

Временная диаграмма уровня принятого сигнала служит дополнительным свидетельством того, что падения уровня не вызваны прямым затенением радиосигнала лопастями ротора, что в любом случае было бы невозможно, поскольку радиоканал проходит по касательной к границе ветряной электростанции. Вместо этого лопасти ротора создают отражения, которые постоянно перекрываются и меняются по поляризации и продолжительности, что приводит к многолучевому приему. В случае наложения нескольких путей приема в противофазе эти пути почти полностью взаимно компенсируются. Таким образом, в принципе, возможны более резкие падения уровня, чем те, которые показаны здесь.

При заданных условиях приема измерения калиброванной напряженности поля уже невозможны. Декодирование сигналов с цифровой модуляцией невозможно.

В любом случае возникает значительная потеря чувствительности при декодировании аналоговых сигналов и сигналов с цифровой модуляцией, которую нельзя полностью компенсировать техническими средствами (например, установкой антенны с более высоким коэффициентом усиления).

---