



**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**  
Учебно-научный институт Телекоммуникаций и информатизации

**ДОКЛАД**

**ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ  
СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ 4G И 5G**

Докладчик: директор института  
доктор технических наук, профессор

**КОЗЕЛКОВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ**



# ДЕВЯТЬ ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНОВ ОТНОСИТЕЛЬНО РАДИОРЕГЛАМЕНТОВ



Таблица 1

Номер диапазона	Символ	Частотный диапазон (нижняя грань исключается, верхняя грань учитывается)	Соответствующий метричный подраздел	Метричное сокращение для диапазона
4	<b>VLF</b> (ДНЧ)	От 3 до 30 кГц	Мириаметровые волны	B.Mam
5	<b>LF</b> (НЧ)	От 30 до 300 кГц	Километровые волны	B.km
6	<b>MF</b> (СЧ)	От 300 до 3000 кГц	Гектометровые волны	B.hm
7	<b>HF</b> (ВЧ)	От 3 до 30 МГц	Декаметровые волны	D.dam
8	<b>VHF</b> (ДВЧ)	От 30 до 300 МГц	Метровые волны	B.m
9	<b>UHF</b> (УВЧ)	От 300 до 3000 МГц	Дециметровые волны	B.dm
10	<b>SHF</b> (НВЧ)	От 3 до 30 ГГц	Сантиметровые волны	B.cm
11	<b>EHF</b> (КВЧ)	От 30 до 300 ГГц	Миллиметровые волны	B.mm
12		От 300 до 3000 ГГц	Децимиллиметровые волны	



# ДВЕНАДЦАТЬ ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНОВ ОТНОСИТЕЛЬНО СТАНДАРТА **IEEE 521-2002**



Таблица 2

Название диапазона	Частотный диапазон	Происхождение названия
HF (ВЧ) диапазон	3-30 МГц	Высокие частоты
VHF (ДВЧ) диапазон	30-300 МГц	Очень высокие частоты
L-диапазон	1-2 ГГц	Длинные волны
S-диапазон	2-4 ГГц	Короткие волны
C-диапазон	4-8 ГГц	Компромис между S и X
X-диапазон	8-12 ГГц	Применялся во время Второй мировой войны для управления огнем. <<X>> означает прицел
Ku-диапазон	12-18 ГГц	Ниже коротких (Kurz-under)
K-диапазон	18-27 ГГц	Короткие (Kurz)
Ka-диапазон	27-40 ГГц	Выше коротких (Kurz-above)
V-диапазон	40-75 ГГц	
W-диапазон	75-110 ГГц	W следует за V
G-диапазон	110-330 ГГц	



# КОСМИЧЕСКИЕ УСЛУГИ В КОНТЕКСТЕ МСЕ



- Фиксированная спутниковая услуга
- Межспутниковая услуга
- Космическая эксплуатационная услуга
- Мобильная спутниковая услуга
- Сухопутная спутниковая услуга
- Морская мобильная спутниковая услуга
- Авиационная мобильная спутниковая (R) услуга
- Авиационная мобильная спутниковая (OR) услуга
- Услуга спутникового вещания
- Спутниковая услуга радиоопределения
- Морская радионавигационная спутниковая услуга
- Авиационная радионавигационная спутниковая услуга
- Радиолокационная спутниковая услуга
- Спутниковая услуга исследования земли
- Метеорологическая спутниковая услуга
- Сигнальная спутниковая услуга стандартной частоты и времени
- Услуга космических исследований
- Аматорская спутниковая услуга
- Радиоастрономическая услуга



# ГЛАВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ к 5G



- Предпочтительное ограничение количества технологий в целях минимизации операционной расходов;
- Обязательность обратной совместимости с предыдущими технологиями;
- Непрерывное развитие технологии LTE в частотном диапазоне ниже 6 ГГц, дополненным диапазонами более высоких частот (6-100ГГц);
- Как альтернатива- абсолютно новый радиointерфейс, имеющий совместимость с существующими интерфейсами;
- Интеграция с дополнительными технологиями (3GPP с non-3GPP), в том числе 3GPP и Wi-Fi.



# КЛЮЧЕВЫЕ РЕШЕНИЯ И ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ 5G



- Применение малых сот Small Cell со сверхплотным распределением (один приемопередатчик на каждого пользователя), разгружающих макросы сети с разделением сред передачи команд управления и пользовательского трафика между макро- и Small-сотами в разных полосах частот (концепция “Phantom Cell”).
- Применение так называемых “массивных” (многомерных) MIMO , в которых эффективно реализуется режим динамического формирования направленных лучей для передачи (3D/Beam forming), позволяющий увеличить энергетический выигрыш в ожидаемых высоких диапазонах частот и улучшить покрытие и спектральную эффективность в ультраплотных малых сотах
- Использование новых методов множественного доступа, получивших название Non - Orthogonal Waveform и дающих выигрыш в спектральной эффективности по отношению к OFDM
- Применение полного дуплекса FD (Full Duplex)-одновременной передачи и приема в общей полосе частот, преимущественно в коротких соединениях “точка-точка” (D2D)

# МИРОВОЙ СПУТНИКОВЫЙ РЫНОК, (млрд долл.)

Таблица 3

<b>Доходы рынка</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
Всего:	168	177,4	188,8	195,2	201	211,3	225,2	237,6
Спутниковые услуги	99,2	107,8	113,5	118,6	123	128,2	132,8	137,1
Спутниковая голосовая связь	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1
Спутниковый интернет	1,6	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	2,0



# СПУТНИКОВЫЙ ТРАНСПОРТ (ВЕСОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ)



- Фемтоспутники до 100г
- Пикоспутники до 1 кг
- Наноспутники от 1 до 10 кг
- Микроспутники от 10 до 100 кг
- Мини-спутники от 100 до 500 кг
- Большие КА более 1000 кг



# ЦЕНОВЫЕ ЗАТРАТЫ НА СОЗДАНИЕ КА РАЗНЫХ КЛАССОВ

Таблица 4

Класс КА	Масса, в т.ч. топливо (кг)	Производство (\$ млн)	Запуск (\$ млн)	Страхование (\$ млн)	Суммарные затраты (\$ млн)
Большой КА	> 10 000	154	100	62	316
Наноспутник	1-10	3.0	0.2	0.8	4.0
Пикоспутник	0.1-1	1.5	0.1	2.0	2.0



# ПРИЕМУЩЕСТВА “СПУТНИКОВОЙ НАНОСРЕДЫ”



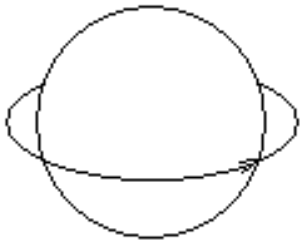
- Мобильность, простота использования и универсальность
- Значительное снижение стоимости космических полетов
- Снижение риска больших финансовых потерь в случае аварии
- Значительное увеличение числа запусков
- Возможность быстрого запуска "по запросу";
- Возможность реализации концепции создания многоспутниковых орбитальных группировок, обеспечивающих непрерывное глобальное покрытие Земли. Такие системы обладают высокой живучестью, надежностью;
- Простота управления.

## Типы орбит

Таблица 5

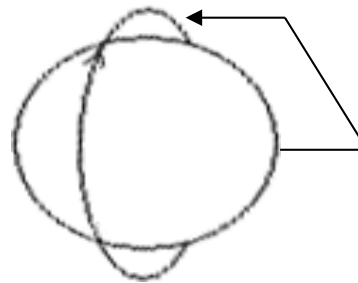
Экваториальная

$$i = 0^{\circ}$$



Полярная

$$i = 90^{\circ}$$



Прямая (движется по направлению вращения Земли)

$$0^{\circ} < i < 90^{\circ}$$



Обратная или ретроградная (движется против вращения Земли)

$$90^{\circ} < i < 180^{\circ}$$

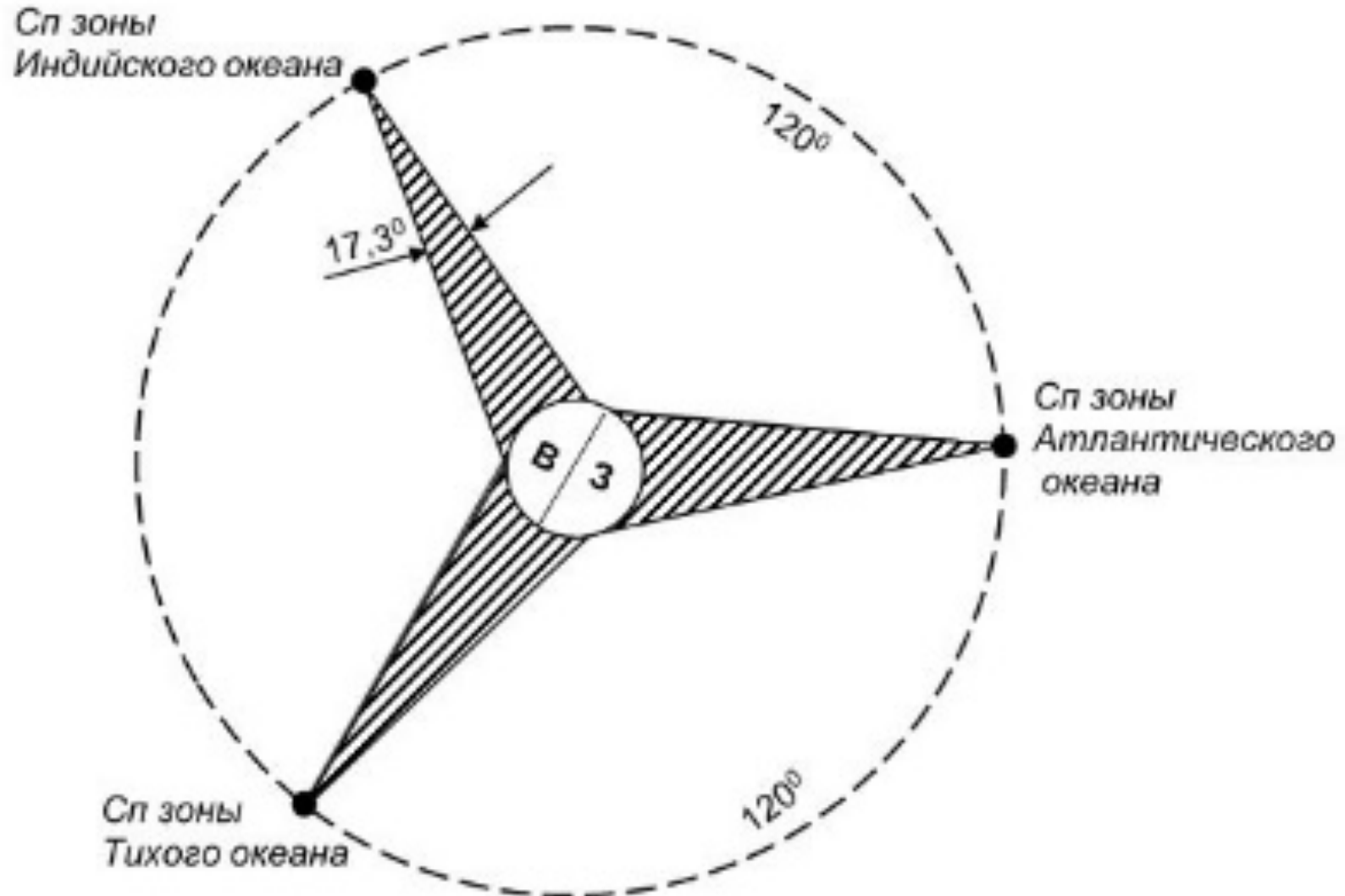


## Классификация орбит

Таблица 6

Форма	Периодичность	Наклон
Круговые	Синхронные	Прямые
Близкие к круговым	Несинхронные	Обратные
Эллиптические		Полярные
Геостационарные		Экваториальные
Параболические и гиперболические		

# АНАЛИЗ МЕТОДА ПОСТРОЕНИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ( $i = 120^\circ$ )



# ДЛЯ НИЗКИХ ОРБИТ ПРЕДЛАГАЕТСЯ ВЫБОР ВЫСОТЫ ОРБИТЫ



$$H_{1\max} = \sqrt{\frac{D_{1\max}^2}{4} + (R_Z + h_{\text{атм}})^2} - R_Z, \quad (1)$$

$$H_{2\max} = \sqrt{D_{2\max}^2 + R_Z^2 + D_{2\max} \times R_Z \times \sin \delta_{\min}} - R_Z, \quad (2)$$

где  $D_{\max}$  - максимально возможная дальность связи между КА сети.

$R_Z = 6371$  км – средний радиус Земли,

$h_{\text{атм}} \approx 100$  км – высота атмосферного слоя, в котором происходит наиболее сильное затухание радиоизлучения.

$$\Delta t_{\text{св}} \approx \frac{T}{\pi} \times \arccos \frac{\cos \varphi_3}{\cos \nu};$$

$$\varphi_3 = \arccos \left( \frac{R_Z \times \cos \delta}{R_Z + H} \right) - \delta,$$

где  $\delta_{\min}$  – минимальный угол возвышения КА над горизонтом, при котором возможна радиосвязь.

$$T = 2\pi \times \sqrt{\frac{a^3}{\mu_0}} = 2\pi \times \sqrt{\frac{(R_Z + H)^3}{\mu_0}}, \quad (3)$$

$$\nu = \arccos \left( \frac{R_Z \times \cos h_k}{R_Z + H} \right) - h_k, \quad (4)$$

где  $T$  – период обращения КА;

$\mu_0$  – гравитационная постоянная Земли;

$\varphi_3$  – предельный центральный угол зоны обслуживания (рис. 5);

$\nu$  – угловое расстояние от абонента до трассы КА;

$h_k$  – угловая высота кульминации КА над горизонтом;

$2\gamma$  – ширина диаграммы направленности бортовой аппаратуры КА;

$\varphi_3$  – предельный центральный угол зоны обслуживания;

$\delta_{\min}$  – минимальный угол возвышения КА над горизонтом, при котором возможна радиосвязь.

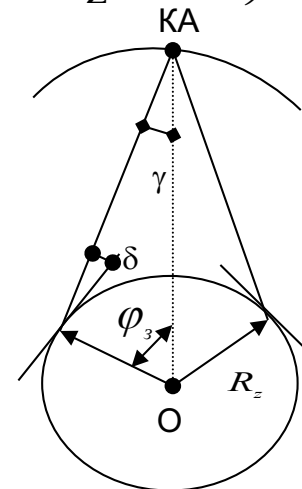


Рис. Элементы землеобзора

Тогда

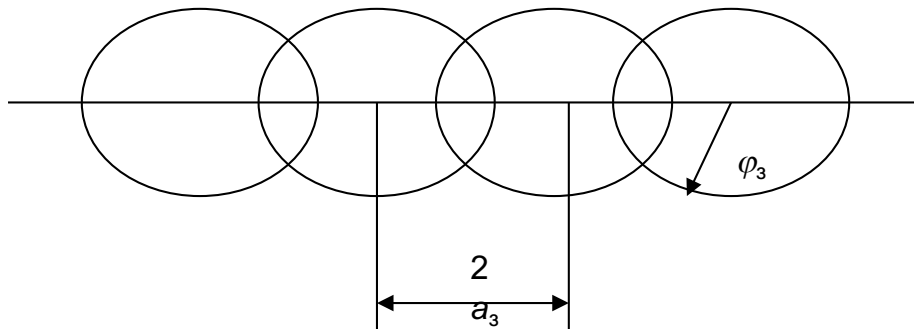
$$\Delta t_{\text{св}} = 2 \times \sqrt{\frac{(R_Z + H)^3}{\mu_0}} \times \arccos \left\{ \frac{\cos \left[ \arccos \left( \frac{R_Z \times \cos \delta}{R_Z + H} \right) - \delta \right]}{\cos \left[ \arccos \left( \frac{R_Z \times \cos h_k}{R_Z + H} \right) - h_k \right]} \right\}.$$

## АЛГОРИТМ РАСЧЁТА ОРБИТАЛЬНЫХ ГРУПП

$$n_{\min} = E \left[ \frac{2\pi}{2\varphi_3} \right] + 1, \quad (5)$$

$$a = \frac{2\pi}{2n_{\min}}. \quad (6)$$

где  $E[Z]$  - антье – (ближайшее целое от  $z$ , не превосходящее его).



$$b = \arccos \left( \frac{\cos \varphi_3}{\cos a} \right). \quad (7)$$

$$m_{(1)} = E \left[ \frac{\pi}{2b} \right] + 1. \quad (8)$$

$$N_{(1)} = m_{(1)} n_{\min}. \quad (9)$$

Рис. 4. К определению половины углового расстояния между подспутниковыми точками двух смежных КА одной плоскости

# РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА ТРЕБУЕМОГО ЧИСЛА КА

Таблица 7

Н, км	500	1000	1500	2000
n, шт	16	10	8	7
m, шт	8	6	5	4
N, шт	128	60	40	28

Таблица 8

№ п/п	Наименование физического эффекта	Причины возникновения физического эффекта	Характер влияния на качество связи
1	2	3	4
1.1	Затухание сигналов	а) молекулярное затухание в “спокойной” тропосфере б) затухание в гидрометрах	Снижение энергетического потенциала  То же
1.2	Рассеяние сигналов	а) рассеяние в гидрометрах б) турбулентное рассеяние	То же
1.3	Рефракция радиоволн	а) регулярная рефракция б) флуктуация коэффициента преломления	То же
1.4	Мерцания (сцилляции амплитуды и фазы) сигналов	а) мерцание вследствие рефракции радиоволн б) мерцание в турбулентностях в) мерцание в водных или льдосодержащих облаках	То же



Таблица 9

№ п/п	Наименование физического эффекта	Причины возникновения физического эффекта	Характер влияния на качество связи
1	2	3	4
1.5	Доплеровские искажения (смещение и деформации спектра) сигналов	Вариации коэффициента преломления волн в среде распространения	То же
1.6	Снижение пространственной и поляризационной избирательности антенн	Возрастание ошибок и потерь наведения антенн	То же
1.7	Уменьшение эффективного коэффициента усиления антенн	а) флюктуации угла прихода волны б) нарушение когерентности (фазовой декорреляции) сигналов по апертуре из-за фазовой дисперсии траекторий лучей	То же
1.8	Излучение (шум) тропосферы	а) излучение “спокойной” тропосферы б) излучение гидрометеоров в) излучение турбулентностей	Появление дополнительной помехи и искажений

# ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ РАДИОСИГНАЛОВ

Таблица 10

№ п/п	Наименование физического эффекта	Причины возникновения физического эффекта	Характер влияния на качество связи
1	2	3	4
1.9	Дифракция радиоволн	Дифракция на рельефе местности	То же
1.10	Образование тропосферных волноводных каналов	А) приемные “волноводы” Б) приподнятые “волноводы”	
1.11	Деполаризация радиоволн	а) деполаризация в гидрометеорах б) деполаризация в турбулентных образованиях в) деполаризация вследствие фарадеевских вращений г) деполаризация в водных или льдосодержащих облаках д) деполаризация вследствие многолучевого распространения	



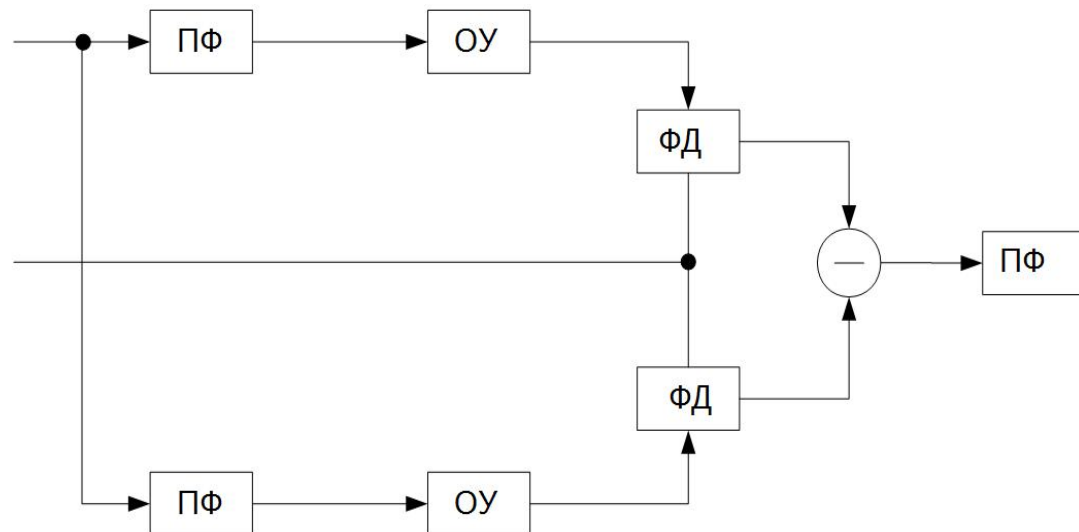
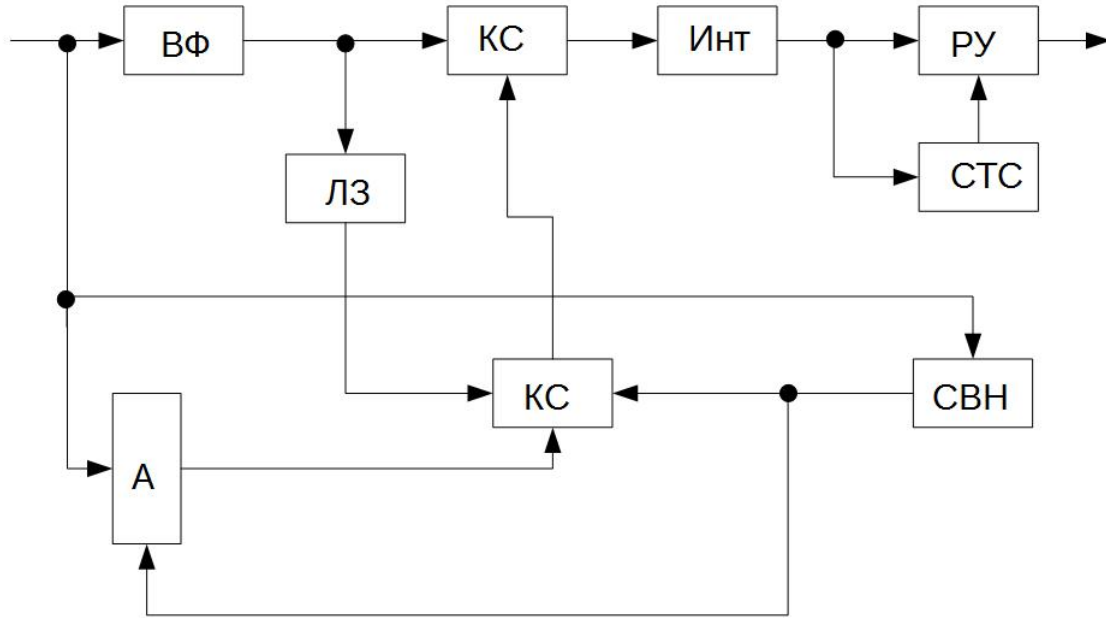
# ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ РАДИОСИГНАЛОВ



Таблица 11

№ п/п	Наименование физического эффекта	Причины возникновения физического эффекта	Характер влияния на качество связи
1	2	3	4
1.12	Возрастание уровня внутри-межканальных помех	а) снижение пространственной и поляризационной избирательности антенн б) образование пространственных волноводных каналов в) дифракция на рельефе местности	
1.13	Многолучевое распространение	а) дискретная многолучевость (счетное множество)	Ограничение максимальной скорости лучей
1.14	Дисперсионные свойства тропосферы	А) амплитудная дисперсия вследствие неравномерного затухания в полосе частот сигнала Б) амплитудно-фазовая дисперсия в турбулентных образованиях	То же
1.15	Возрастание уровня искажений сигналов	Увеличение потерь при оптимальной обработке сигналов вследствие ограничения полосы и радиуса когерентного тропосферного канала	

# ВАРИАНТ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РТС



Предположим, что общее время сеанса связи равно:

$$\Delta T = \sum_{i=1}^N \Delta T_i + \sum_{j=1}^M \Delta T_j = T_1 + T_2, \quad (1)$$

где  $T_1$  – продолжительность работы демодулятора сигналов без частотно-селективных замираний, причем  $\Delta T = \sum_{i=1}^N \Delta T_i$ ;  $T_2$  – длительность частотно-селективных замираний в канале связи (продолжительность работы демодулятора сигналов с частотно-селективным замираниями), причем  $T_2 = \sum_{j=1}^M \Delta T_j$ .

Тогда средняя величина вероятности ошибки демодулятора сигналов равна:

$$\bar{P} = \frac{P^* T_1 + P^{**} T_2}{\Delta T} \quad (2)$$

где  $P^*$  - вероятность ошибки в канале безчастотно-селективных замираний;

$P^{**}$  - вероятность ошибки в каналах с частотно-селективными замираниями.

Так как в демодуляторе сигналов при наличии частотно-селективных замираний используется автокорреляционный режим приема, а при отсутствии частотно-селективных замираний когерентный, то (2) можно записать следующим образом:

$$\bar{P} = \frac{P_{\text{ког}}^* T_1 + P_{\text{авт}}^{**} T_2}{\Delta T} = |T_1 = T_2| = \frac{P_{\text{ког}}^* + P_{\text{авт}}^{**}}{2} \quad (3)$$

Вероятность ошибки известного демодулятора сигналов прототипа будет равна

$$P_{\text{пр}} = \frac{P^* T_1 + P^{**} T_2}{\Delta T} = \frac{P_{\text{ког}}^* T_1 + P_{\text{ког}}^{**} T_2}{\Delta T}. \quad (4)$$



Тогда

$$\frac{P_{\text{пр}}}{\bar{P}} = \frac{\Delta T(P_{\text{ког}}^* T_1 + P_{\text{ког}}^{**} T_2)}{\Delta T(P_{\text{ког}}^* T_1 + P_{\text{авт}}^{**} T_2)} = |T_1 = T_2| = \frac{P_{\text{ког}}^* + P_{\text{ког}}^{**}}{P_{\text{ког}}^* + P_{\text{авт}}^{**}}. \quad (5)$$

При  $h = 2$  для ОФМ-2 при величине фазовых искажений в канале  $\Delta\varphi = 60^\circ$  используется формула:

$$\begin{aligned} P_{\text{ког}}^* &= 2F(\sqrt{2}h \cos 0)[1 - F(\sqrt{2}h \cos 0)], \\ P_{\text{ког}}^{**} &= 2F(\sqrt{2}h \cos 60)[1 - F(\sqrt{2}h \cos 60)], \\ P_{\text{авт}}^{**} &= 0,5 \exp(-h^2/2) \end{aligned}$$

Получим

$$\frac{P_{\text{пр}}}{P} = 2,3 \text{ раза}. \quad (6)$$

Т.е. вероятность ошибки прототипа известного демодулятора сигналов при приеме КВЧ радиосигнала, прошедшего через радиоканал с частотно-селективными замираниями, для ОФМ2 и  $h = 2$  в 2,3 раза больше, чем вероятность ошибки предлагаемого демодулятора сигналов.

Или же, для  $P_{\text{ош}} = 5 * 10^{-3}$  предлагаемого демодулятора сигналов по сравнению с прототипом составит 1дБ.

Техническое преимущество данного демодулятора сигналов по сравнению с прототипом состоит в том, что повышается помехоустойчивость демодуляции КВЧ радиосигналов.



**Спасибо за внимание!**