

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R SM.2211报告
(06/2011)

**信号地理定位的到达时间差
和到达角方法对比**

SM 系列
频谱管理



国际电信联盟

前言

无线电通信部门的作用是确保所有无线电通信业务，包括卫星业务，合理、公平、有效和经济地使用无线电频谱，并开展没有频率范围限制的研究，在此基础上通过建议书。

无线电通信部门制定规章制度和政策的职能由世界和区域无线电通信大会以及无线电通信全会完成，并得到各研究组的支持。

知识产权政策 (IPR)

ITU-R的知识产权政策在ITU-R第1号决议附件1引用的“ITU-T/ITU-R/ISO/IEC共同专利政策”中做了说明。专利持有者提交专利和许可声明的表格可从<http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>获得，该网址也提供了“ITU-T/ITU-R/ISO/IEC共同专利政策实施指南”以及ITU-R专利信息数据库。

ITU-R 系列报告

(可同时在以下网址获得：<http://www.itu.int/publ/R-REP/en>)

系列	标题
BO	卫星传输
BR	用于制作、存档和播放的记录；用于电视的胶片
BS	广播业务（声音）
BT	广播业务（电视）
F	固定业务
M	移动、无线电测定、业余无线电以及相关卫星业务
P	无线电波传播
RA	射电天文
RS	遥感系统
S	卫星固定业务
SA	空间应用和气象
SF	卫星固定和固定业务系统之间频率共用和协调
SM	频谱管理

注：本ITU-R报告英文版已由研究组按ITU-R第1号决议规定的程序批准。

电子出版物
2011年，日内瓦

© ITU 2011

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段翻印本出版物的任何部分。

ITU-R SM.2211 报告

信号地理定位的到达时间差和到达角方法对比

(2011年)

目录

页码

1	引言	1
2	TDOA技术概述	1
3	TDOA相较于传统AOA的优势和劣势	2
4	小结	6
5	参考文献	7

1 引言

本报告对比了信号地理定位的到达时间差（TDOA）方法对到达角（AOA）方法的优势与劣势。尽管本报告侧重于TDOA技术，需要注意的是还存在其他地理定位技术¹。AOA方法测定一个电波在一个测试点的到达角。AOA方法已经被普遍使用于许多测向应用中，有一些优点，也有一些缺点，例如相对于天线的要求。而TDOA方法则是计算电波在多个测试点的到达时间差，并基于定时和电波对比来推算信号源所在的位置，TDOA方法尚未广泛地应用于频谱监测，但由于现在已有便宜且装配紧凑的计算能力、更先进的无线接收机技术、现存可用的数据链，以及精确分发的定时信号，TDOA方法已经变得越来越有用。本报告提供了TDOA技术的简要概述，以及TDOA方法与更传统的AOA方法相比的优势和劣势。

2 TDOA技术概述

TDOA技术测试一个射频信号到达空间中几个点的时间，并对比每个接收机之间的时间差。传统的TDOA估算方法是计算一个信号到达两个接收机的互相关。TDOA估算出互相关函数的最大值得出的延迟。由于已知每个接收机的位置，在所有接收机时间同步的情况下，

¹ 接收信号强度（RSS）方法使用一个信号在多个测试点所测得的功率比来计算信号的发射源点。RSS经常用于室内定位。到达频率差（FDOA）方法使用一个移动发射源（和/或多个接收机）的多普勒频移来计算信号的发射源点。FDOA经常与TDOA方法一起用于机载应用。

可以推导出发射源的估算位置。AOA系统的方位线（LoB）的一个补充，是一个恒定的到达时间差双曲线，叫做等时线或位置线（LoP）。关于TDOA方法更全面的讨论，可见国际电联2011版《频谱监测手册》的第4.7.3.2节。

TDOA方法已经被使用于一些防务应用中的无线电定位任务，近来还用于一些特定应用，如用于应急响应（火灾、急救等）的蜂窝移动电话定位。过去阻碍更广泛地民用推广的主要障碍是需要纳秒级的时间同步。由于电磁辐射以大约30 cm/ns的速度传播，接收机间的任何明显定时抖动，都会直接转换成位置精确度的降低。今天，卫星定位系统（GPS，Galileo和GLONASS）的到来，提供了一个非常容易获得且便宜的维持时间同步的方式。因此，基于TDOA的系统现在已经可从世界各地不同国家的几个供应商购买。

3 TDOA相较于传统AOA的优势和劣势

为了更好地理解TDOA，我们提供了其相比于AOA的优势和劣势的简要概述。需要注意的是，TDOA和AOA对于地理定位是互补的技术。结合了上述两项技术的地理定位系统可能优于任何使用单独一项技术的系统[1]。此外，具有备用和被认可的地理定位的方法，对频谱执行行动是至关重要的。

为了简化讨论，我们假定TDOA系统使用基于互相关的检测技术，测试接收机将抽样信号转发给中心服务器进行TDOA处理。对于大多数频谱监测应用，这种方法由于定位的性能和灵活性而得到优先选用。为了更进一步简化讨论，我们将TDOA与相关干涉仪（CI）AOA系统进行对比。相关干涉是广泛用于现代无线监测中AOA技术的方法。相关干涉仪在国际电联2011版《频谱监测手册》第4.7.2.2.5节介绍和讨论。

（注1 – 表3-1和3-2中的引用的“章节”，是指国际电联2011版《频谱监测手册》。表中括号内的数字是指第5节中列出的参考文献。）

表3-1

TDOA的优势

对天线的要求简单	<p>天线是低成本、低复杂度，并且可以是小尺寸。</p> <p>TDOA接收机可以只用一根简易天线（例如一根单极天线或双极天线）。不像AOA系统，该天线不需要高精密的机械容差和电子精度，也不需要运行测试和校准测量。另外一项额外的好处是天线可以是小尺寸并做到不引人注目。当监测系统部署在受历史遗迹或建筑艺术限制的场所或与第三方谈判设站协议时，这一点很重要。</p>
对设站和校准的要求简单	<p>对设站的要求不像AOA那么严格，需要很少甚至不需要校准。</p> <p>这使得选择TDOA站址时更灵活。因此，可以更快地部署TDOA设施。在城区安装时，可以放置额外的TDOA接收机，以克服高层建筑的屏蔽效应。</p> <p>相反，选择AOA站址时，必须要最大限度地减少由于本地障碍物的散射、地面反射，以及大地传导率的改变而造成的波前失真。一些AOA天线阵列必须在站点上安装后进行校准，以最大限度地减少频率和方向相关误差。天线阵校准是AOA中最重要的限制其性能的问题之一[2]。AOA设站问题在第4.7.2.3.1.2和2.6.1.3节中有进一步的讨论。</p>

表3-1 (续)

<p>宽带、低SNR信号和持续时间短的信号</p>	<p>对于新出现的调制复杂、宽带和持续时间短的信号，TDOA性能很好。</p> <p>AOA一般在窄带信号上性能较好，但高级AOA方法可用于定位包括宽带、复杂和持续时间短在内的任何信号。</p> <p>TDOA的性能与信号带宽密切相关。如果FFT信道宽度与信号带宽接近，AOA的性能与信号带宽大致无关。TDOA的性能通常随着信号带宽的增加而改善。</p> <p>TDOA和AOA都是在SNR高的信号和整体时间更长信号上性能更好。来自相关性的处理增益，使得TDOA技术能探测和定位SNR低甚至为负的信号。此外，相关处理增益使得额外的TDOA接收机能参与地理定位，虽然他们可能具有很低或负的SNR。基础AOA技术不能探测并定位SNR为负的信号，在定位SNR低的信号时也可能有问题。高级AOA技术，例如高分辨率或数据辅助相关的AOA技术（参考DF）可以处理这些信号。</p> <p>虽然一般的AOA不能从借助信号相关性而产生的处理增益中获益，它可在一定程度上从系统增益中获益，该系统增益可通过使用多个天线单元和接收机信道得来。</p> <p>地理定位持续时间短的信号需要协调一致的接收机。时间同步到信号逆带宽的一小部分。这一能力对于TDOA系统来说非常重要。此外，TDOA可以在持续时间长的信号上很短时间的测试来进行地理定位。如果AOA天线单元可转换，需要的整体持续时间则可减少。</p>
<p>系统的复杂度</p>	<p>TDOA接收机和天线比一般AOA天线阵和双或多信道接收机简单。TDOA接收机至少需要一个实时射频信道，用于不间断处理和最高的信号截取概率⁽¹⁾。这使得在简单无线环境中可以使用更简单的接收机。当在复杂的无线环境中使用简单的接收机时，需要使用高级TDOA处理技术。时间同步的有效方法和数据接口已现存可用。</p>
<p>抑制非相关噪声和干扰</p>	<p>TDOA中使用的相关处理，可以抑制同信道、同时遇到的站点间非相关的噪声和干扰信号。这一性能使得系统能地理定位信号对干扰+噪声比低（低SINR）的信号。</p> <p>所有的接收机都进行时间一致的测试。不属两个或更多接收机共同的信号将被抑制。如果具有高级处理能力，TDOA系统可以仅使用与最佳观测到的发射信号之间的相互关系实现地理定位。第4.8.5.5节给出用于干扰分析的互相关技术的相关应用。</p> <p>高级AOA系统可以通过使用与参考信号的相关性，来减轻非相关的同时遇到的同信道干扰的影响。其他例如MUSIC的高级处理技术可以对非相关噪声和干扰表现出强大的能力。但是，这些技术的计算过程复杂，且未在频谱监测上广泛使用。</p>
<p>室内、体育场和校园内的地理定位</p>	<p>如果使用高级处理技术，TDOA可用于对高带宽信号在室内、小范围的室外（<单边100米）以及大量多径环境下[4]进行地理定位。</p> <p>AOA系统一般不能在这些情况下保持好的性能。精确的室内定时同步这一难题，可通过IEEE-1588兼容型以太网和TDOA接收机解决。需要提及的是，在大量多径、小范围环境，特别是对于窄带信号，另外一种利用接收到信号强度（RSS）的地理定位技术通常比TDOA表现更好。</p>

表3-1 (续)

<p>在一些情况下，减轻相干的共信道干扰（多径）</p>	<p>AOA和TDOA方法都受多径，也即相干的共信道干扰影响。每种方法都受传感器相对于多径发射的位置不同程度地影响</p> <p>如果信号具有足够带宽，TDOA对于本地障碍物（本地多径）造成的波前失真较不敏感。TDOA可能需要通过高级信号处理来解决远处障碍物（远距离多径）造成的位置模糊。高级信号处理可进一步过滤TDOA地理定位中使用的相关对，以改善大量多径情况下的定位结果。如果具有高级TDOA处理，时间决定的站点间多径可被抑制[5]，使得在稠密的城市环境下⁽²⁾有好的性能。</p>
<p>几何学考虑</p>	<p>当信号源位于测试站点形成周界的中心时，TDOA和AOA都最精确。</p> <p>TDOA地理定位的精度由几何精度因子（GDOP）、时间同步特性和TDOA估算特性决定。定位不确定性与TDOA接收机之间的基线距离不直接相关[6]。这在一些情况下很有好处。</p> <p>相反，AOA方法的精度与信号源和每一个AOA接收机之间的距离直接相关。AOA定位的不确定性是方位角不确定性和接收机与估算位置之间距离的函数。当信号源远离周界时，TDOA大致估计出一条类似AOA的方位线的位置线。在这种情况下，位置和方位的不确定性随着距离增长对于两种方法来说是一样的。</p>
<p>非常适合用于射频传感器网络</p>	<p>对于TDOA和AOA，通过靠近增益和改善了的统计，接收机越多可使结果越好</p> <p>由于其低复杂度、小尺寸、低功率、简单的天线以及简化了的设置要求，TDOA非常适合于部署多个接收机。更高密度的远端监测站，正如上面所说的射频传感器，使得监测接收机更靠近目标信号。获得的路径损耗的减少，有时称作“靠近增益”，可以改善探测和地理定位的性能[7]。此外，来自TDOA技术相关性的处理增益，使得额外的传感器可以加入地理定位中来，虽然他们或许只有很低甚至负的SNR。</p>
<p>可在中心服务器进行完全离线分析</p>	<p>TDOA系统能存储并分类来自于所有接收机的时间上协调一致的信号测试，所以中心服务器可以进行完全离线的分析。这包括每个接收机信号的频谱分析、互相关性测试和地理定位。</p> <p>AOA系统也可以在中心服务器存储并分类一些信号测试（例如方位结果和方位位置信度）。这些测试可将时间协调到AOA系统可获得的时间同步的程度。例如频谱分析和互相关的测试不常见，因为他们需要如TDOA的回程数据速率。</p>

⁽¹⁾ 典型的相关干涉系统采用时分复用（TDM），以减少所需的接收机数量。这些系统需要使用2到3个接收机，在5、7或更多个天线间转换。这些系统比完全平行的DF系统简单，但对信号最短持续时间要求大些以便定位。

⁽²⁾ 已报告TDOA在稠密市区环境下对窄带（30 kHz）AMPS蜂窝电话信号地理定位到小于几百尺 r.m.s（5）。

表3-2

TDOA的劣势

窄带信号	<p>缓慢变化的信号，包括未调制的载波和窄带信号，使用TDOA技术不能或难以定位。</p> <p>TDOA性能与信号带宽密切相关，性能随着信号带宽的减小而降质。而且，当信号的瞬间特征与延时扩散广泛相关时，多径对于窄带信号更是潜在的问题。在这些情况下，由多径导致的脉冲型的失真更难区别，增加了时分估算的误差。与可接受性能相对应的最小信号带宽随着应用而变化。例如，已报告TDOA在稠密市区环境下对窄带（30 kHz）AMPS蜂窝电话信号地理定位到小于几百尺RMS [5]。更高的SNR条件和更长观测时间可以改善TDOA对一些窄带信号的定位。</p> <p>AOA系统在窄带信号、未调制信号以及宽带信号上性能均好。</p>
单站不可能实现归位和离开	<p>归位和离开⁽¹⁾需要至少两个TDOA站，其中至少可以移动式以及一个数据链路。</p> <p>AOA归位和离开地理定位方法可通过一个便携式站实现。在网络化的TDOA接收机不可实现或不经济的场合，这使得地理定位可以实施。这些方法在第4.7.3.3节描述。</p>
高数据速率通信链路	<p>从接收机到中心服务器发送抽样波形信号的TDOA系统，需要高数据速率的通信链路。接收机的组网需求是非对称的，上载带宽超过下载带宽。高级的处理技术，包括信号压缩，可以减少传输的数据。在接收机上建立TOA的TDOA系统具有适中的数据速率要求。TDOA数据链路需求在第4.7.3.2.4节“网络考虑”中做进一步讨论。</p> <p>AOA系统需要更低的数据速率，因为只需要如方位角、频率和时间等一些信号特性被发送到中心站。</p>
对去相关的信号源敏感	<p>TDOA系统必须小心缓解接收机之间所有潜在的去相关信号源。这些包括接收机之间的相对参考频率的偏移、由于移动源或本地环境而产生的相对信号频率偏移（多普勒频移）。限制最大相干整合时间的因素不仅有信号持续时间，也有接收机参考振荡器的稳定性和无线信道的动态性能。</p> <p>高质量的TDOA系统应包括跟踪环路以维持频率和时间的相干性。对于弥补多普勒转换源的去相关影响，自动多普勒校正至关重要。</p> <p>基础的AOA系统和一些高清晰AOA系统（使用MUSIC）对测试站点之间信号去相关性不敏感。与参考信号相关的高级AOA系统对信号去相关性敏感。</p>
更精确的时间同步	<p>相比目标信号的反向带宽而言，TDOA需要更高质量的时间同步。通过现有技术是可以实现TDOA接收机时间同步优于20 ns（例如GPS）。</p> <p>AOA对于时间同步的要求少一些。可以宽松到在接收机之间几秒的程度。实际工作中，一些例如持续时间短或跳跃的目标信号，需要更高级别的AOA站同步。</p>
包含周期性成分的信号	<p>尽管可能性不大，但在一些情况下，TDOA算法可能会对于包含周期性成分的信号得出不正确的答案。这些信号的例子包括重复数字序列或同步脉冲。这一问题和最小化其影响的一种方法，在第4.7.3.2.3节“影响精度的因素”中进一步描述。</p> <p>由于基础AOA系统不执行信号交叉相关，他们对这个问题不敏感。</p>

表3-2 (续)

地理定位计算速度	抽样的信号通常被发送到地理定位服务器用于计算。这对网络能力和速度提出了要求。慢速链接会显著地延迟地理定位的计算时间 典型的地理定位速率，对于TDOA，大约在每秒1次定位的水平，而AOA则是每秒100次定位。使用带宽较高的数据链路可改善TDOA地理定位速度。使用更短的观察时间和/或更先进的压缩技术，也可减小对数据带宽的需求。一旦测试结果被发送到中心服务器，重新计算出来的TDOA地理定位会显著地加快，因为他们工作于存储在本地的数据。
不适合用于对多个发射源同时地理定位	一些AOA系统支持对多个频率分隔的信号同时进行地理定位，这通常叫做宽带DF。这一能力对于TDOA来说是可能的，但并不适合，主要是因为需要高得多的数据传输。 通过在每一个接收机执行信号同步（建立TOA）的数据辅助，可减少TDOA的数据传输。
单站定位不可能	至少需要2个感应器来产生所需的位置线，需要至少3个感应器来进行2维地理定位，至少4个感应器来进行3维地理定位。 AOA可用于单站定位。
几何学考虑	当信号源位于测试站点形成的周界中心时，TDOA和AOA精度最高（最佳GDOP）。 从测试站点形成区域边界处开始，TDOA定位精度比AOA减小得更快。 当信号源远离周界时。TDOA估算出一个类似于AOA方位线的位置线。在这种情况下，位置和方位的不确定性随距离的增长对于两种方法来说是类似的
单站测试情况下的离线分析	如果用AOA，单站测试结果可离线分析出方位线。而单站的测试结果是可能离线分析出TDOA位置线的。

(1) RSS方法可用于只采用一个可移动站的归位和离开。

4 小结

TDOA是一项尚未广泛用于无线电监测的补充性的地理定位技术。由于已经有了便宜且装配紧凑的计算能力、更先进的无线电接收机技术、无所不在的数据链接以及精确分布的定时同步，TDOA已经变得越来越有用，它相对于AOA来说具有一些优势。特别是探测并地理定位现代宽带信号、对天线的简单需求、在市区环境下处理近距离多径传播的能力，并顺应低成本传感器网络的部署，它对于AOA来说也有劣势。特别是在定位窄带和未调制的信号、常常需要更多的回传数据，它需要至少2个接收机用于位置线信息，至少需要3个接收机实现2维定位。现代信号监测正经历一个信号带宽不断增加而功率谱密度不断减少的趋势，补充使用例如TDOA的地理定位技术，可以改善在许多环境下现代信号的探测和定位。AOA/TDOA混合系统可以抵消单个技术的劣势。

5 参考文献

- [1] BROUMANDAN, ALI *et al.* [2008] *Practical Results of Hybrid AOA/TDOA Geolocation Estimation in CDMA Wireless Networks*. Calgary: s.n., 2008. IEEE 68th Vehicular Technology Conference. 978-1-4244-1722-3.
 - [2] KRIZMAN, KEVIN J., BIEDKA, THOMAS E. and RAPPAPORT, THEODORE S. [1997] *Wireless Position Location: Fundamentals, Implementation Strategies, and Sources of Error*. s.l.: IEEE, 1997. Vehicular Technology Conference. Vol. 2, p. 919-923.
 - [3] SCHWOLEN-BACKES, ANDREAS. [2010] *A comparison of radiolocation using DOA respective TDOA*. Hamburg: Plath GmbH.
 - [4] PATWARI, NEAL *et al.* [July 2005] Locating the nodes: Cooperative localization in wireless sensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*. p. 54-69.
 - [5] STILP, LOUIS A. [1997] TDOA technology for locating narrowband cellular signals: Cellphone location involves several practical and technical considerations. Time difference-of-arrival (TDOA) technology provides accuracy for locating analog cellphones in urban environments. *Urgent Communications*. [Online] 4 1.
http://mrtmag.com/mag/radio_tdoa_technology_locating/index.html.
 - [6] TORRIERI, DON J. [1984] Statistical Theory of Passive Location Systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. Vols. AES-20, 2.
 - [7] AGILENT TECHNOLOGIES [2009] *Techniques and Trends in Signal Monitoring, Frequency Management, and Geolocation of Wireless Emitters*. Application Note. 5990-3861EN.
-