

国 际 电 信 联 盟

**ITU-R**  
国际电联无线电通信部门

**ITU-R SM.2211-2 报告**  
(06/2018)

**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**

## 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所需表格可从<http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/zh>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 系列建议书

（也可在以下网址获得：<http://www.itu.int/publ/R-REP/zh>）

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

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  
2018年，日内瓦

© 国际电联 2018

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.2211-2 报告

## 信号地理定位的到达时间差和到达角方法对比

(2011年-2014年-2018年)

## 目录

	页码
1 引言 .....	2
2 TDOA技术概述 .....	2
3 TDOA相较于传统AOA的优势和劣势 .....	2
4 混合系统 .....	7
5 小结 .....	7
6 参考文献 .....	7
附件 1 – 影响监测站射频检测范围和地理定位覆盖区域的因素 .....	8
附件 2 – 对混合AOA/TDOA监测站地理定位精度和覆盖区域的研究 .....	21
附件 3 – 关于与现有AOA系统一起使用TDOA系统的试用研究 .....	30

## 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<sup>1</sup>。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，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。由于电磁发射以大约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6节中列出的参考文献。）

---

<sup>1</sup> 到达功率（POA）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。POA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。

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。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>
宽带、低SNR信号和持续时间短的信号	<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>
系统的复杂度	<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。</p> <p>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>

TABLE 3-1 (续)

<p><b>抑制非相关噪声和干扰</b></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><b>室内、体育场和校园内的地理定位</b></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（&lt;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POA的地理定位技术通常比TDOA表现更好。</p>
<p><b>在一些情况下，减轻相干的共信道干扰（多径）</b></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><b>几何学考虑</b></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><b>非常适合用于射频传感器网络</b></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>

表 3-1 (完)

<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

<p>窄带信号</p>	<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>
<p>单站不可能实现归位和离开</p>	<p>归位和离开<sup>(1)</sup>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>
<p>高数据速率通信链路</p>	<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>

表 3-2 (续)

<p><b>对去相关的信号源敏感</b></p>	<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>
<p><b>更精确的时间同步</b></p>	<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>
<p><b>包含周期性成分的信号</b></p>	<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>
<p><b>地理定位计算速度</b></p>	<p>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。</p> <p>典型的地理定位速率，对于TDOA，大约在最高每秒1次定位的水平（最好情况），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。</p>
<p><b>不适合用于对多个发射源同时地理定位</b></p>	<p>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。</p> <p>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。</p>
<p><b>单站定位不可能</b></p>	<p>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。</p> <p>AOA可用于单站定位。</p>

表 3-2 (完)

几何学考虑	<p>当信号源是在由一组互动传感器和/或定向 (DF) 站形成的周界之内时, TDOA和AOA精度都最高 (最佳GDOP)。</p> <p>在刚出此周界处, TDOA定位精度和效率比AOA降低更加迅速 (参见附件1和[8])。</p> <p>当信号源远离此周界时, TDOA可以估算出一个类似于AOA方位线的位置线 (参见附件1和[8])。AOA在二个DF站覆盖区域重叠的范围内实现地理定位 (即, 指示二条方位线的交叉点)。</p> <p>对于与TDOA和AOA网络射频检测范围和地理定位覆盖区域相关的信息, 请见附件1。</p>
单站测试情况下的离线分析	<p>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不可能离线分析出TDOA位置线的。</p>

(1) POA方法可用于只采用一个可移动站的归位和离开。

#### 4 混合系统

TDOA可以与另外一种或多种地理定位技术相组合生成一种可以被称为混合系统的系统。TDOA和AOA技术可以在一个或多个站中组合, 形成混合AOA/TDOA系统。TDOA也可以与其他的地理定位技术相组合, 例如POA幅度比技术, 形成一个混合TDOA/POA系统。

混合AOA/TDOA系统最少包括二个站点, 其中至少一个站点同时具有AOA和TDOA测量能力, 而剩余的站点具有TDOA测量能力。二个TDOA传感器产生表示时间差值的一条双曲线, 如在ITU频谱监测手册2011年版第4.7.3.2章中所描述。该AOA系统产生方位线 (LoB)。该方位线与TDOA双曲线的交点就确定了发射源的位置。在附件2和附件3中将对这些系统进行更加详细的讨论。

#### 5 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, 同时兑现每种技术的优势。移动TDOA站仅仅在采用AOA的混合情况中才能有效。

#### 6 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](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.
- [8] KOZMIN, Vladimir A., PAVLYUK, Alexander P. and TOKAREV, Anton B. [2014] Comparison of spectrum monitoring coverage features of AOA and TDOA geolocation methods – *Electrosviaz*, No. 2, 2014 (see translation into English at the website: <http://www.ircos.ru/en/articles.html>).

## 附件1

### 影响监测站射频检测范围 和地理定位覆盖区域的因素

#### 1 引言

对于监测站有多种影响其射频检测范围和地理定位覆盖区域的部署考虑。无论其性能特性如何，任何监测站的总有效性将受到设备选择、安装和站址所提供限制或优势的影响。

在实际部署当中，频谱监测系统（SMS）将很可能同时由部署在固定和移动平台上的AOA和TDOA站组合构成。对一个监测站点所用地理定位技术的选择有很多考虑，并且通常将基于以下因素：

- 站址对于电源和网络的接入。
- 邻近信号能量 — 期望的和非期望的。靠近无线服务或工业级电力设备设置监测站点在很多大都市地区中已经变得很有必要。
- 站点对于所监测地区的地势和线路。
- 发射源的密度和频谱流量本性。
- 用户设施在所监测地区中的重要性（即，关键基础设施或是政府装置等）。
- 监测活动的持续时间。一些监测产品由于体积小、可采用电池运行和便于拆装而非常适合于短期监测活动（少于12小时）。
- 站点装置因素，包括设备尺寸、可以得到及使用电源、网络连接、站址租赁、设备校准与维护。

此外，一个SMS可以包含新老技术（例如，采用新技术对现有站进行扩增），以及现有监测设备的条件与功能。选择一种技术来应对所有可能的场景是不实际的。每种地理定位技术具有在一定情况下而不是在所有情况下很好发挥作用的方面。

这里采用了具有一组特定条件进行的模拟来展示设计选择和发射源特性对射频检测范围和地理定位覆盖区域的影响。后面的模拟基于在2004年到2007年之间制定的工业标准传播模型<sup>2</sup>。它们不考虑实际的三维地形数据，并且因此射频覆盖是从每个监测站点均匀建模的。这就提供了看到在理想情况下发射源带宽、功率、天线高度等各种影响的能力。这些模拟采用一个日常用来回答问题的软件工具“我将需要大约多少个监测站来覆盖所关心的区域？”

## 2 一般考虑

重要的是要首先定义射频（RF）检测范围和地理定位覆盖区域：

- 射频检测范围定义为一个发射源能够以正信噪比（SNR）被检测到时距离监测站的最远距离（km）。检测范围在不同方向上可以不同，取决于地形、建筑物特征和其他因素。
- 地理定位覆盖区域定义为可以在其上对一个发射源采用可行方法（例如，AOA、TDOA、混合、POA）进行合理定位的地理区域。

关键是要注意射频检测范围与地理定位覆盖区域之间的差别，前者要求在监测站有一个正的SNR，而后者在每个监测站都不要一个正的SNR。TDOA地理定位方法将在不同站点所接收的信号相关联，使得能够利用低于本底噪声的信号定位发射源。在站点接收到的噪声功率是不相关的。关于TDOA地理定位方法操作的更加详细信息，请参考ITU频谱监测手册第4.7.3.2.2和4.7.3.2.3节。

一组固定AOADF站和TDOA传感器的地理定位覆盖区域可以通过考虑高达三个相互作用站构成的AOA和TDOA监测网络来进行分析，因为这对三个和二一个站覆盖区域重叠以及仅仅由一个站覆盖的区域的范围给予提升。

我们将考虑在图1中被标记为S1至S3的三个固定传感器和在图2中标记为DF1至DF3的三个固定DF站的地理定位覆盖，它们具有完全相同的几何关系，但是分别工作于TDOA和AOA网络之中。还假设这些网络装备了移动监测站，在图1和2中标记为MS，采用与固定传感器和DF站具有完全相同技术的设备。在图1和2中采用不同颜色的轮廓线来描绘每个固定站各自的射频检测范围。以黄色显示的是对所有固定站共同的射频检测区域，在其中发射源（此后称为“发射机”）具有一个正的SNR。因为TDOA传感器采用时间同步互相关，图1中传感器网络S1至S3对应的地理定位覆盖区域大于图2中DF站DF1至DF3的定位覆盖区域。

应该注意到，在二张图中射频检测范围和地理定位覆盖区域是想象地基于具有一个特定功率和天线高度的一定测试发射机来构成的。如果这些参数被修改，这将必然在一定程度上改变覆盖区域的轮廓线。这将在第3节中更加详细地描述。

对于一个TDOA网络，发射机坐标是基于三条位置线的交点区域来确定的，如图1中与发射机T1的关系所示，此处位置线1-2、3-1和3-2相交。对于一个AOA网络，仅仅采用固定DF站的地理定位是由所有三个DF站来执行的，如图2中所示（方位线1到3有效地定位了发射

---

<sup>2</sup> 在由诺基亚西门子网络负责协调的WINNER（Wireless World Initiative New Radio consortium）I和II中制定的模型。

机T1)。AOA网络在仅仅由二个DF站覆盖的区域中也是有效的，如相同图中与发射机T2的关系所示（方位线4和5）。

图1  
在一个TDOA网络中的地理定位覆盖区域

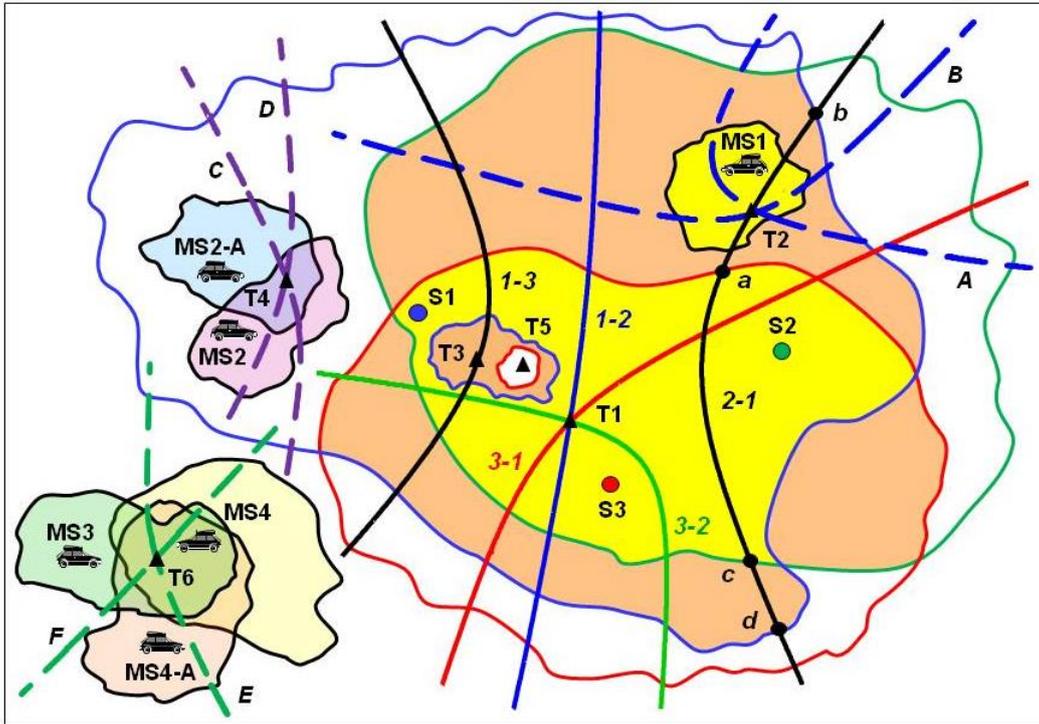
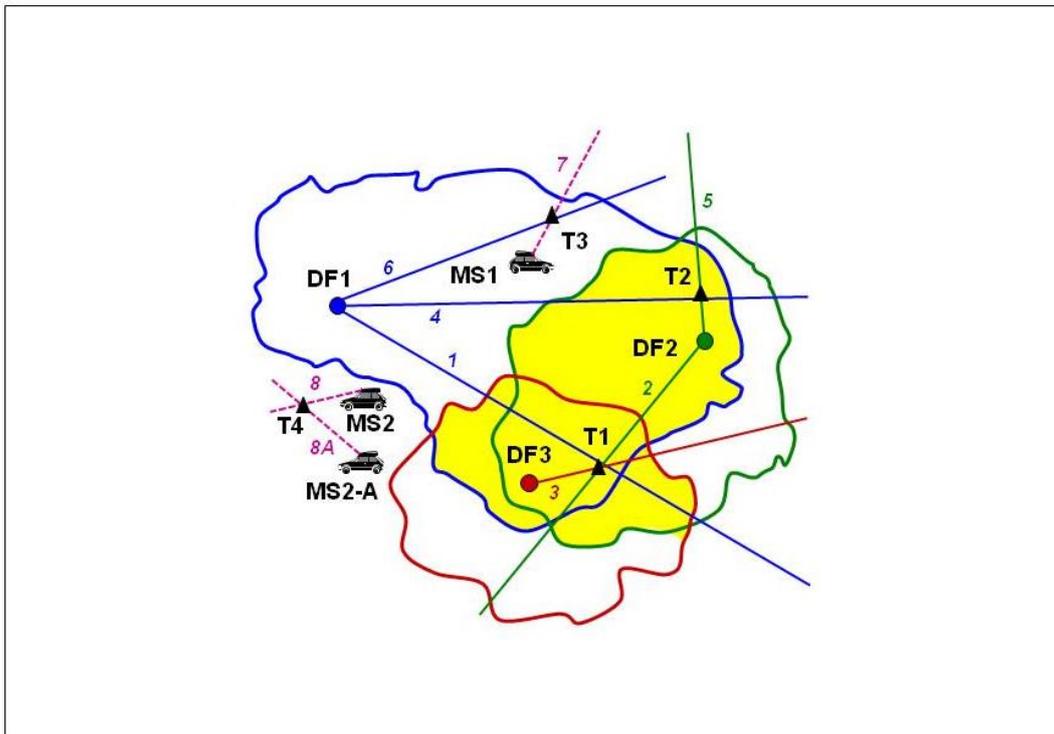


图2  
在一个AOA网络中的地理定位覆盖区域



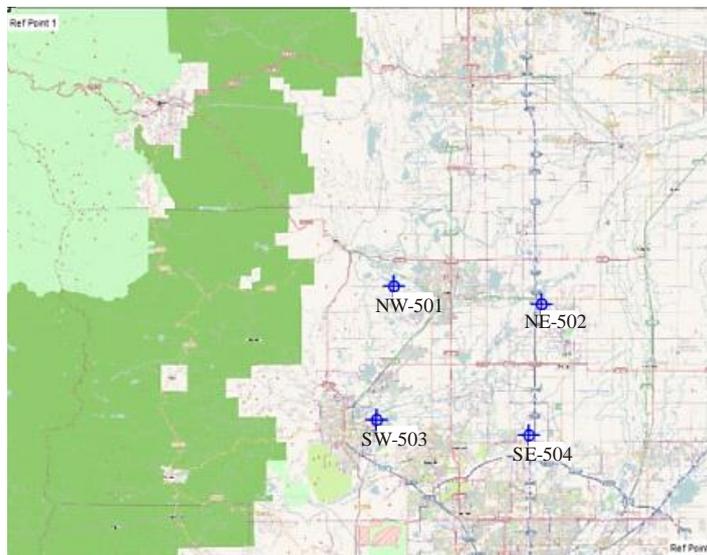
如果在一个TDOA网络中，所涉及的发射机位于传感器边界（图1中为棕色）之外区域之一，该系统可能仅仅产生一条位置线，如与发射机T2有关系的线2-1所描绘或者由指向该发射机的一条方位线所描绘。在这种情况下，该发射机的坐标必须借助一个移动站（图1中的MS1），通过与二个固定传感器相互作用来确定。这在图1中通过位置线2-1与由这个移动站所建立的其他二条位置线（位置线A和B，采用虚线来描述，以强调它们随着该站的四处移动所产生的可变性）的交点所示。

如果所涉及的发射机是间歇性的，则它必须是在TDOA站之一的射频检测范围之内（因此要求一个触发测量）。如果该发射机是持续的，它可以不需要在任何TDOA传感器的射频检测范围之内，但要在地理定位覆盖区域中，以产生对位置的一个估算。实际的位置可以借助于移动站来确定，但在一些情况下可能要占用显著的时间。移动站经常因为天线高度低而具有有限的射频检测范围。但是，有通过采用普遍可用的结构使一个移动站天线提高的技术，例如车库或地势。

在[8]中讨论了按照图1和2以及固定和移动站相互作用实例的其他TDOA和AOA覆盖情况。

### 3 针对影响TDOA和AOA监测站中射频检测范围的因素进行的模拟

图 3  
在科罗拉多州博尔德的模拟区域



作为本节中的实例，采用了在美国科罗拉多州的一个地区，如图3所示。4个站（NW-501、NE-502、SW-503和SE-504）大约间隔18 km。模拟将演示独立工作的传统AOA和TDOA站的射频检测范围。出于此模拟的目的，检测范围被定义为距离能够以正SNR检测到一个发射源的监测站的最远距离（以km为单位）。

此模拟以颜色显示了检测的概率 – 红色是高，而蓝色是低。本节将突出能够影响射频检测范围的因素。这些因素中的一些是在操作者的掌控中，例如：

- 监测站的天线高度和增益。
- 射频馈电电缆的类型和长度，信号条件，例如衰减、滤波器等。
- 该站当地的射频噪声环境。
- 物理环境（包括附近的地形）。

反之，一些因素与监测站没有关系，而是完全取决于发射源的特性：

- 载频。
- 功率输出。
- 信号带宽。
- 发射源天线的高度。

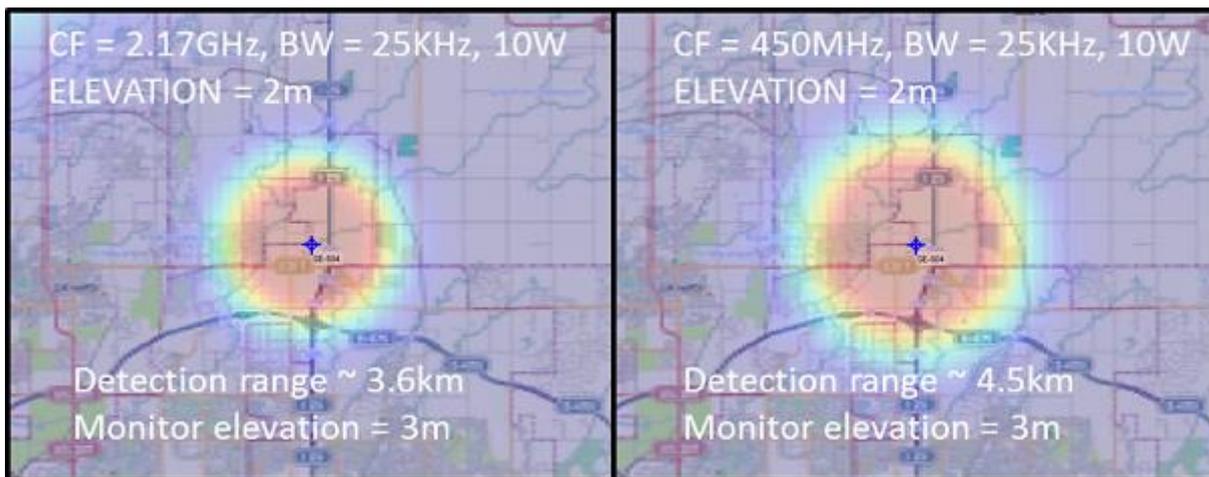
本报告中所采用的模拟工具让使用者能够修改任何或所有这些因素，以确定对射频检测范围和地理定位覆盖区域（对于互相关TDOA地理定位测量）的影响。为了简化，这里采用了一个乡村视距（LoS）地形模型。该模拟工具还具有用于城市、城郊、室内和室内/室外场景的其他模型。它还包括了视距和非视距（NLoS）的传播模型。

### 3(a) 发射源载频的影响

在图4中，SE-504显示在一个南北向17.2 km，东西向21.8 km的一个面积上（这个面积将被用于本节中涉及射频检测范围的所有模拟中）。假设这个站工作在 $-150$  dBm/Hz本底噪声、 $0$  dB天线增益、 $3$  m天线高度、采用一根 $2$  m长LMR-400 RF电缆将接收天线连接到一个射频传感器。对左侧的模拟，发射源载频是 $2.17$  GHz，信号带宽是 $25$  kHz，输出功率是 $10$  W，并且天线高度是 $2$  m。右侧的模拟显示了将发射源载频降低到 $450$  MHz后对射频检测范围的影响<sup>3</sup>。

图4

郊区视距传播模型，发射源和监测站都接近地面高度



较高的频带（ $3$  GHz以上）正被开始用于蜂窝电话和其他需要许可的业务。因为提供覆盖所需的监测位置的数量，从固定站对这些业务进行监测的难度将会增加。出于此原因，基于固定、移动和可迁移监测站网络的技术可能会变得越来越重要。

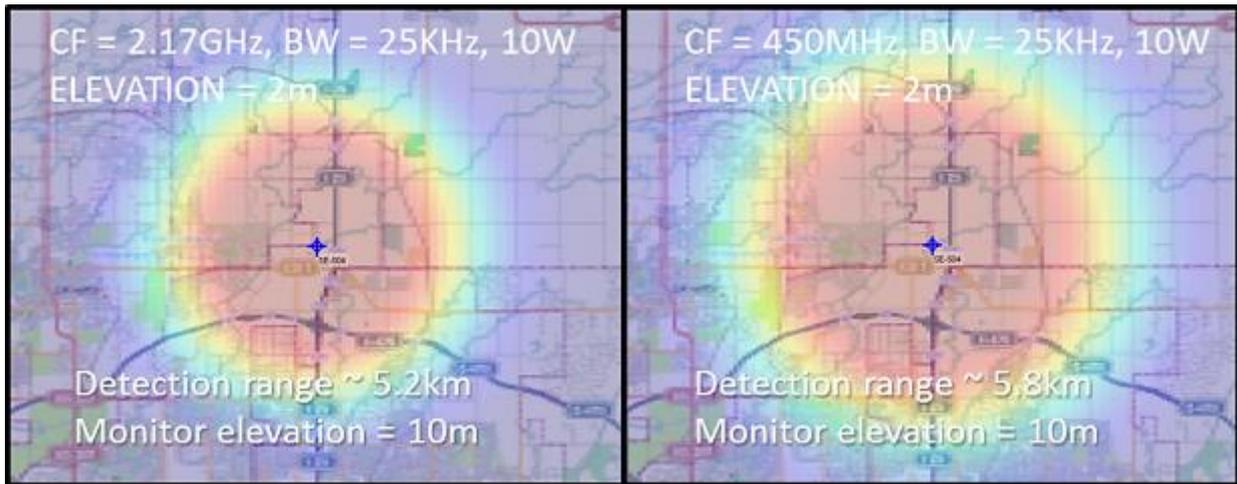
### 3(b) 监测站天线高度的影响

在图5中，监测站的高度被提升到 $10$  m，而所有其他因素保持相同。由于改善了到目标发射源的视距，在期望的射频检测范围上有了一个显著的增加。发射源天线的高度具有一个类似的效应。

<sup>3</sup> 传播损耗在较低频率处也较低，因而导致了一个较大的射频检测范围。

图 5

郊区视距传播模型，发射源接近地面高度，监测站提高



### 3(c) 信号带宽的影响

在图6中，所有因素保持与图5中相同，但是信号带宽从25 kHz增加到200 kHz。请注意检测范围是如何因为较低的功率谱密度而被降低的。

图 6

除了将信号带宽从25kHz改为200kHz，其他与图5相同

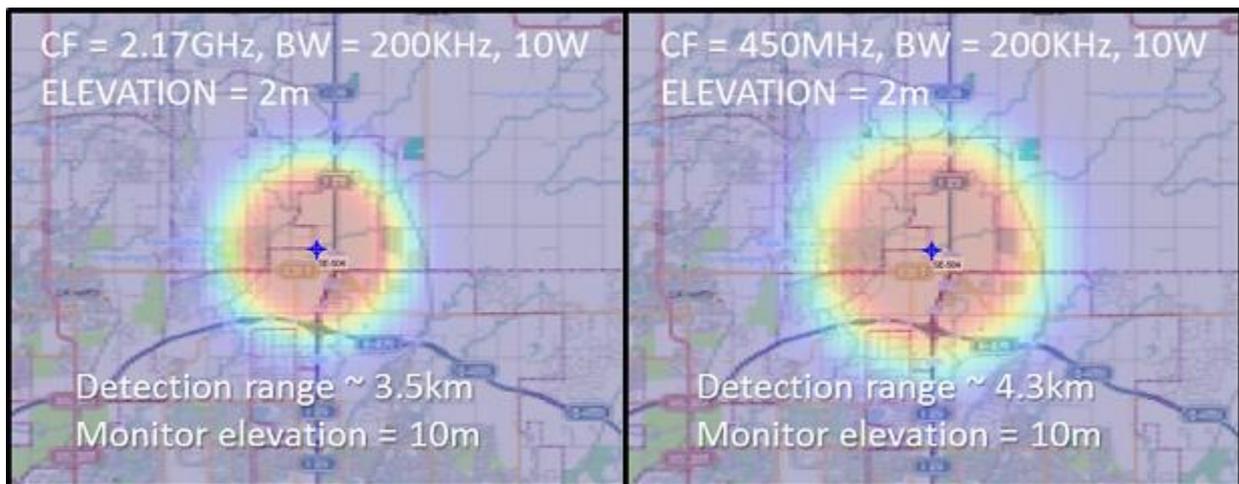
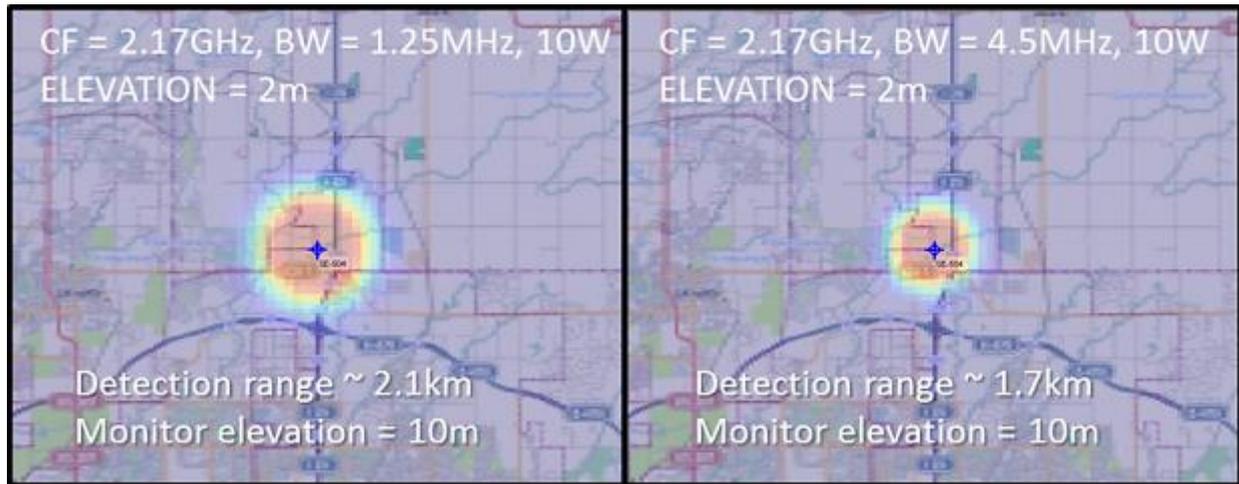


图7显示了在2.17 GHz实例上建立并将信号带宽分别增加到1.25 MHz和4.5 MHz的模拟结果。所有其他变量与图5（左）相同。信号带宽如何影响一个发射源传播长距离的能力并对一个监测站射频检测范围相应的降低是非常清楚的。

图 7

将信号带宽改为1.25 MHz和4.5 MHz带宽，  
而发射源功率、高度和载频保持相同



### 3(d) 天线增益的影响

图8显示了通过添加6 dB天线增益来演示使用一个方向性天线的模拟。信号带宽被设置回25 kHz。这些结果显示了一些传统AOA站的期望覆盖范围，这些站具有与其天线系统相关联的增益，或者来自一个装备了一个方向性天线的TDOA站。地图的比例对到目前为止的所有模拟保持相同。

图 8

天线增益增加到6 dB，发射源带宽减少到25 kHz，  
载频频率分别为2.17 GHz和450 MHz

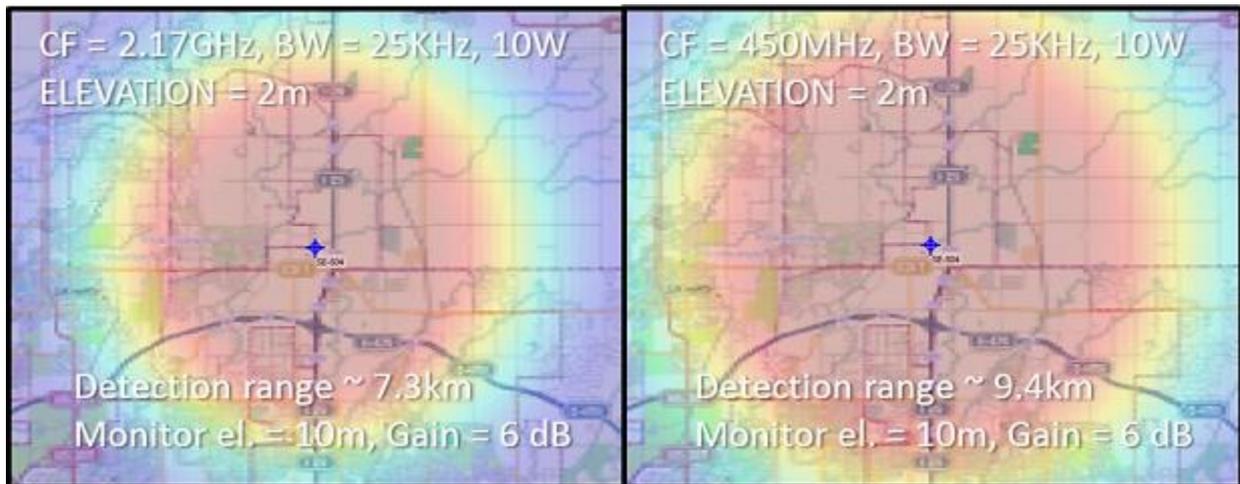
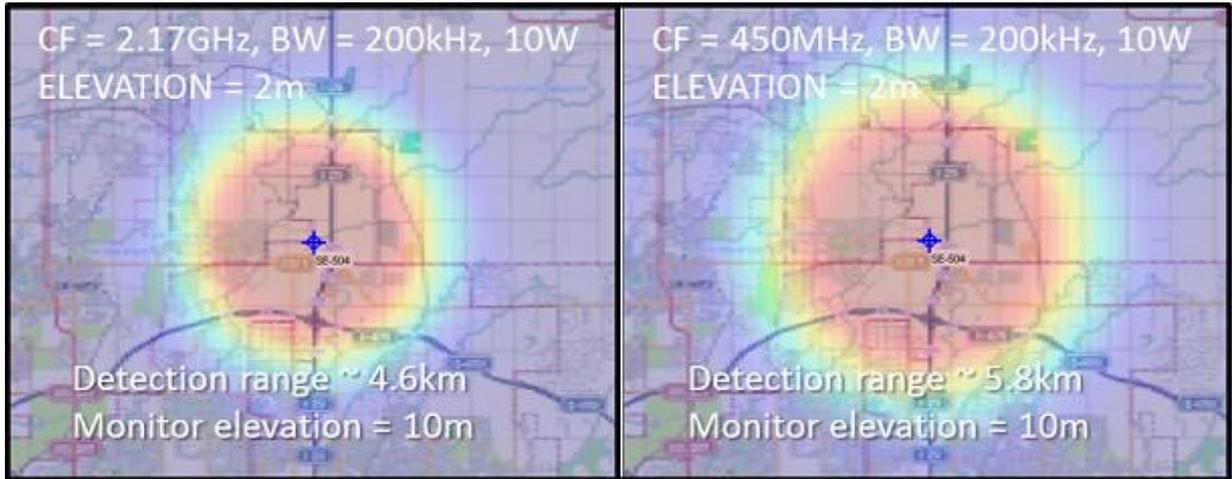


图9显示了与在图8中相同模拟的结果，除了发射源的带宽被增加到200 kHz。

图 9

除了信号带宽增加到200kHz，其他与图8相同

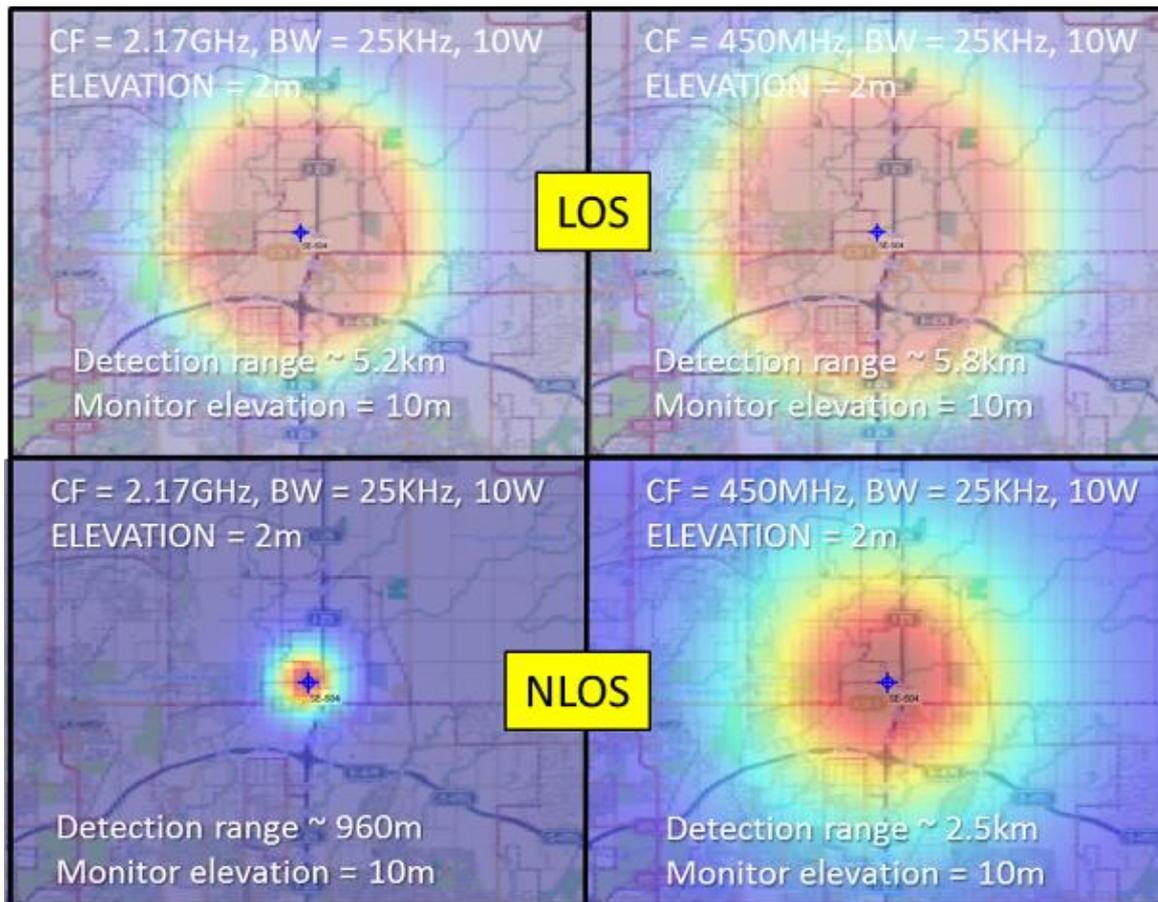


### 3(e) 地形和视距的影响

图4至9显示了一些模拟的结果，这些模拟演示了不同设计因素和发射源特性对独立工作的单独一个监测站射频检测范围的影响。建筑物和地形的阴影效应未被显示在以上的模拟中。为了演示对检测范围的这个影响，图10显示了乡村视距对比于乡村非视距传播的模型。来自图5的相同场景在此处重现在上面的模拟中，对比与下面的非视距传播模型。这非常图形化地显示出了视距可能对射频检测的影响。这还被用来突显出移动和可迁移站对现代频谱监测系统的重要作用。当选择站址和设计一个用于对发射源进行定位测量的监测站时，必须考虑这些因素。

图 10

对射频检测范围的影响：视距传播相比于非视距传播



#### 4 对在TDOA和AOA监测站中影响地理定位覆盖区域的因素进行的模拟

在本节中，画出了一个扩展的地理区域，并显示了四个监测站。在左侧的模拟显示出了独立工作的各个监测站的射频检测范围。在右侧的模拟显示了互相关TDOA测量的地理定位覆盖区域。

地理定位覆盖区域定义为可以在其上对一个发射源采用可行方法（例如，AOA、TDOA、混合、POA）进行合理定位的地理区域。关键是要注意射频检测范围与地理定位覆盖的差别，前者要求在监测站有一个正的SNR，而后者在每个监测站都不要一个正的SNR。

图11显示了一个模拟的结果，其中发射源被设置为2.17 GHz，但是功率电平被降低到1W。当发射源在2 m高度时（并且仍然采用没有地形数据的乡村视距传播模型），监测站的检测范围大约是2.6 km——而考虑到实际中信号将很可能被建筑物或地形所遮蔽，这是非常乐观的。在右侧显示的TDOA地理定位覆盖区域被估计要远大得多，因为它采用了对整个监测站网络的互相关测量<sup>4</sup>。该模拟假设了4对监测站之间的相关。

<sup>4</sup> 在进行TDOA测量的情况下，来自二个分离传感器的发射信号是互相关的，导致对独立噪声特性进行了抑制。在长互相关时间的理论极限中，接收机和环境噪声不是一个因素，并且系统检测特性变得较少受到各个接收机性能的限制，包括噪声指数。

图 11

4个不同监测站的射频检测范围（左）  
 相比于采用TDOA的地理定位覆盖区域（右）

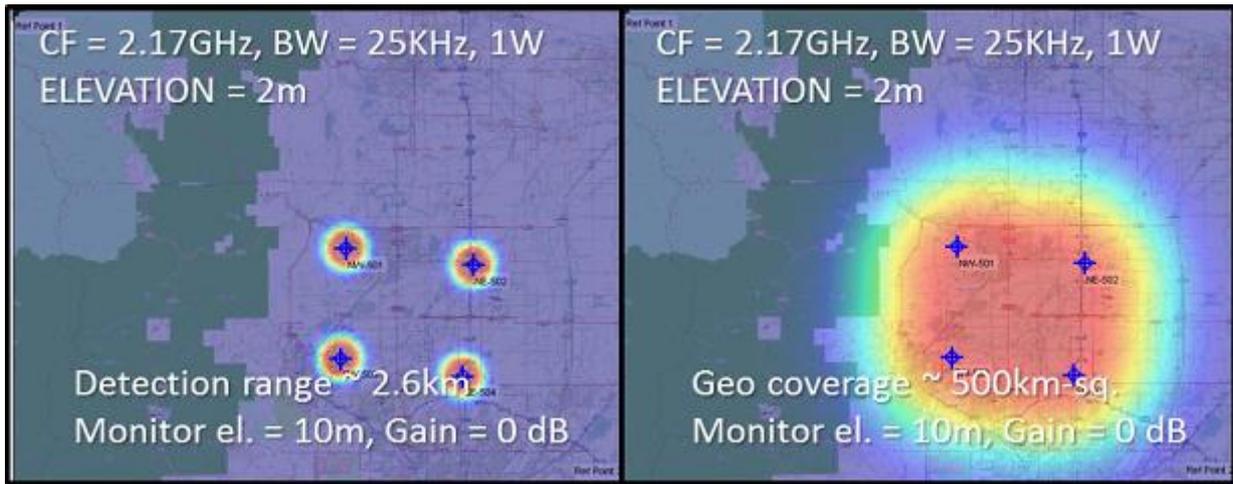
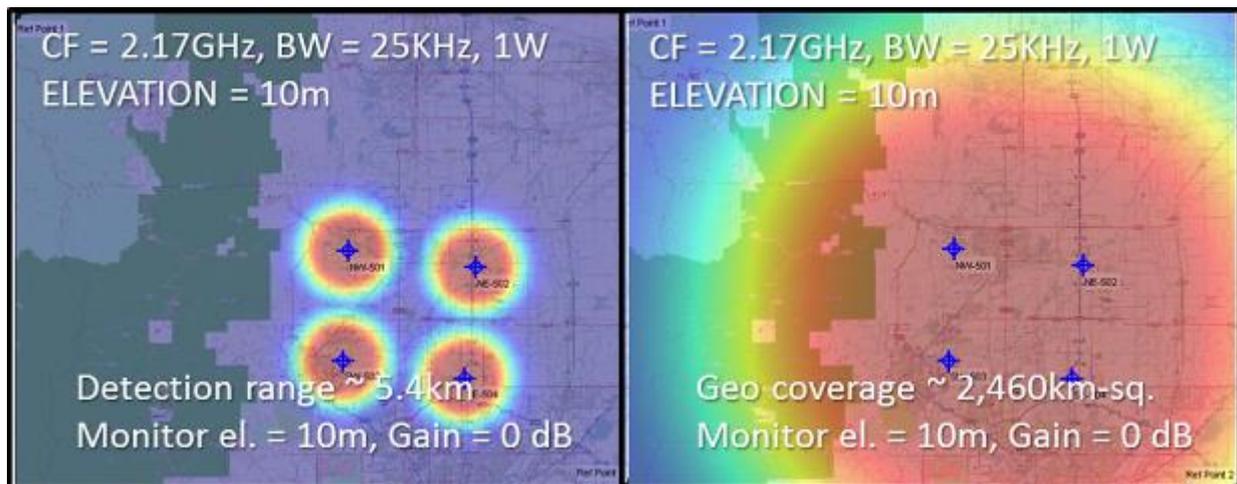


图12显示了一个模拟的结果，它将发射源的高度提升到10 m。这显示了AOA和TDOA系统改进的射频检测范围。TDOA地理定位覆盖区域（在右侧）也被增强。在这个模拟中的一个重要考虑是与该站相对于发射源位置的几何关系相关的几何精度因子（GDOP）。它被用来陈述测量数据中的误差将如何影响定位的最终估值（它被以图形显示在第5章的图14中）。TDOA网络的GDOP随着发射源位置移出监测站所圈定的区域而增加。因此，预期TDOA精度在传感器网络之外降低。尽管该模拟显示了一个大的区域，其中地理定位测量是可行的，但它未显示GDOP对期望精度的影响。

图 12

除了发射源提高到10 m，场景与图11相同



由先进TDOA算法达到的处理增益可以在一个比各个站射频检测范围更大的区域上提供发射源定位能力。

## 5 对模拟与真实射频地理定位测量的比较

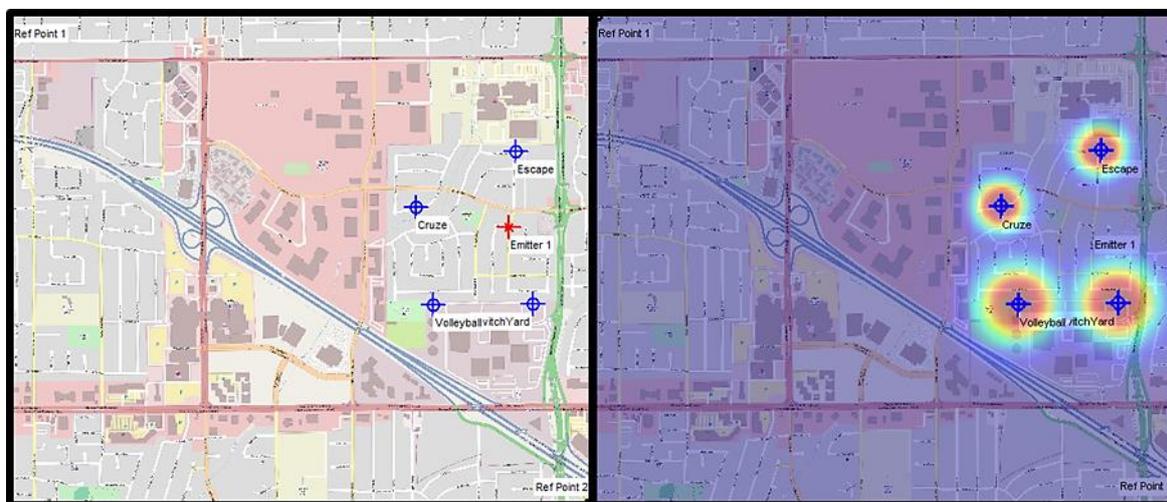
下面描述的实验是为了对与移动电话性质相同的低功率发射源进行定位的特定目的而进行的。因此，监测站之间的间隔小于1 km。尽管这个场景可能不能直接应用于频谱监管的典型任务，但是它可以作为一个很好的实例，来将模拟的测量与实际现场测量进行比较。

进行这个实验的区域是加利福尼亚州的圣塔克拉拉，而地形是具有一些简单工业环境（五到六层的写字楼、医院、停车楼、零售店等）的典型城郊。在此模拟模型中，我们对地形采用了一个“城郊非视距”模型。“Volleyball”和“SwitchYard”站是临时的 – 但是固定采用了全向和贴片定向天线单元。这些是在2.5 m三脚架上并且由小型锂电池供电。“Escape”和“Cruze”站是移动的 – 安装在车辆中，具有磁性安装天线并且所有都是电池供电。发射机环绕由监视站所限定边界的区域移动。

图13(左)显示了监测站的布置和一个测试发射源位置。在这些实例中，发射源是一个从车辆上以2 W在831 MHz（信号带宽大约是4.5 MHz）发射UMTS上行信号的移动电话。右图显示了期望的监测站射频检测范围。如所能看见的，该发射源是在每个监测站射频检测范围之外，假设城郊非视距地形模型。

图 13

圣塔克拉拉发射源定位实验设置及期望的射频检测范围



由于略微高一些且具有指向北方的定向天线，两个最南端监测站的检测范围更大些。所有监测站通过蜂窝调制解调器连接到位于圣塔克拉拉一个写字楼中的一个具有可路由IP地址的地理定位服务器。对传感器网络的控制是通过在携带该发射源的车辆上的笔记本电脑来执行的。

图14（左）显示了一个估计的对此监测站部署的几何精度因子（GDOP）的估计表达。请注意低（好）的GDOP是如何在该网络的边界之外在一些方向上延伸，但不是在所有方向上。在实际中，一个TDOA网络确定到一个发射源的位置/方向的一条直线的的能力可以很好地延伸到监测站周界之外<sup>5</sup>。右侧的图显示了期望的传感器对之间恒定时间差的双曲线。预期地理定位精度在低GDOP（以红色显示）的区域中并垂直穿过双曲线情况下可以得到改善。

<sup>5</sup> 从一簇多个TDOA站产生的一条“位置线”类似于来自一个AOA站的单独一个AOA方位，但是不给出一个地理定位结果。它仅仅提供该发射源的方向(当该发射源是在TDOA站所圈定的区域之外时)。

图 14

圣塔克拉拉站点GDOP和TDOA双曲线显示

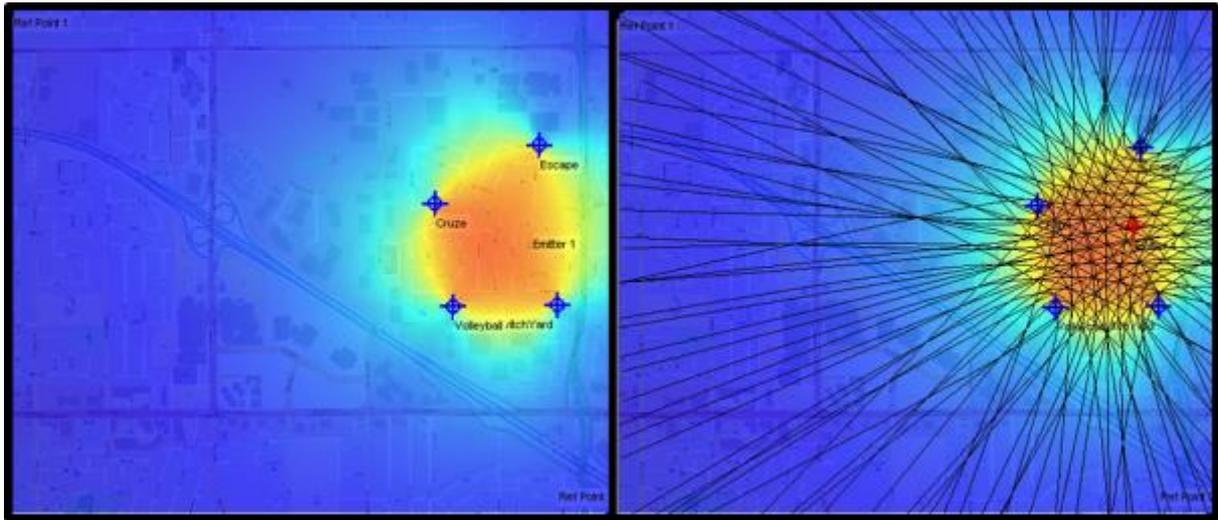


图15（左）显示了期望的地理定位覆盖区域（假设有高达4对传感器的相关）和到该发射源位置的双曲线。右侧图显示了该发射源的实际测量。在此位置进行了多个测量，TDOA误差小于50 m。

图 15

几何覆盖区域估算与实际发射源定位测量

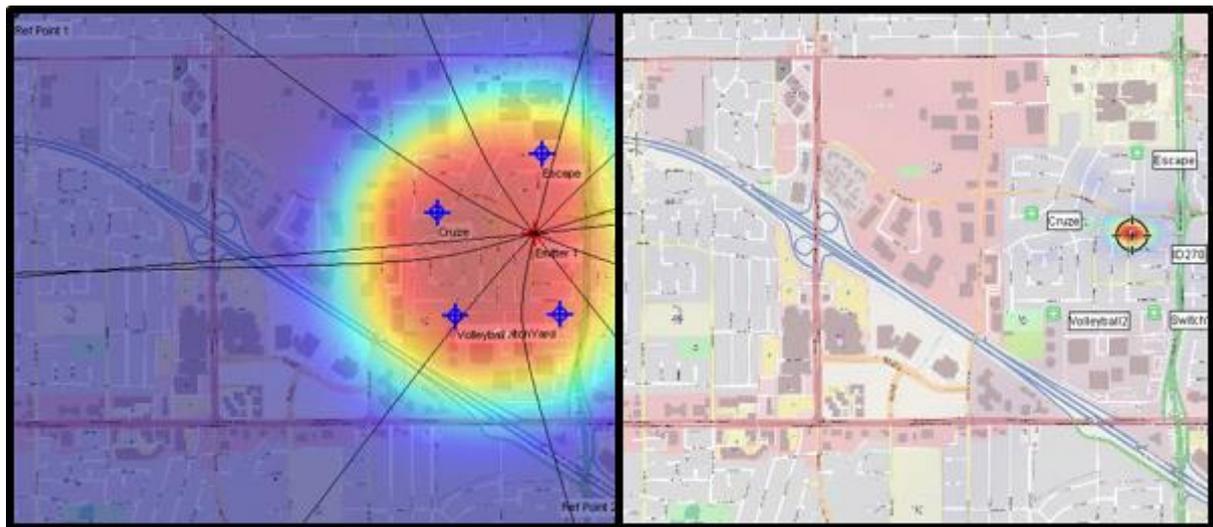
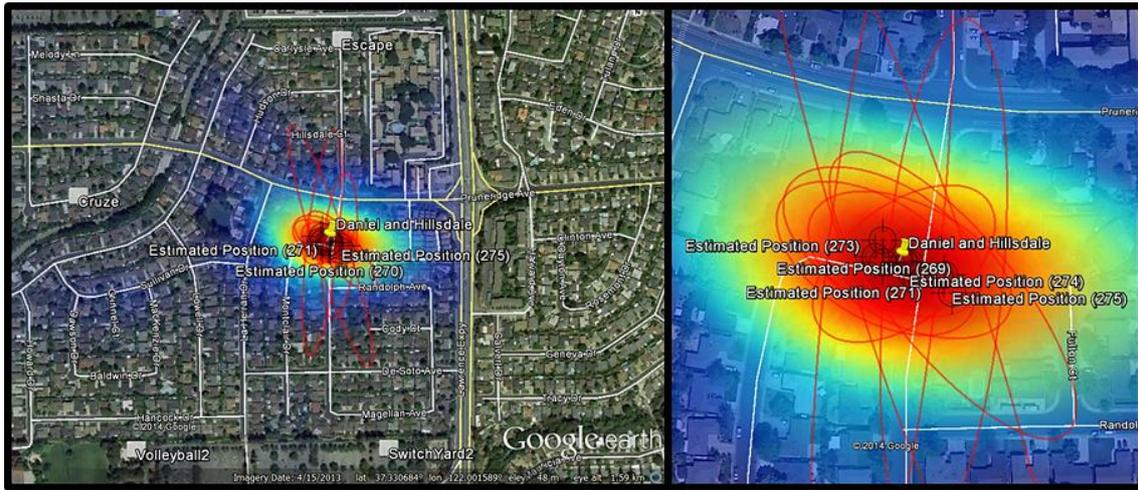


图16以对可能性、椭圆误差概率（EEP）和估计的发射源位置（EP）的相关的染色方法在Google Earth®上重叠显示了多个地理定位的结果。黄色的按钮显示了该发射源的实际位置。

图 16

叠映在谷歌地球上的地理定位测量。右侧显示的是一个放大的视图

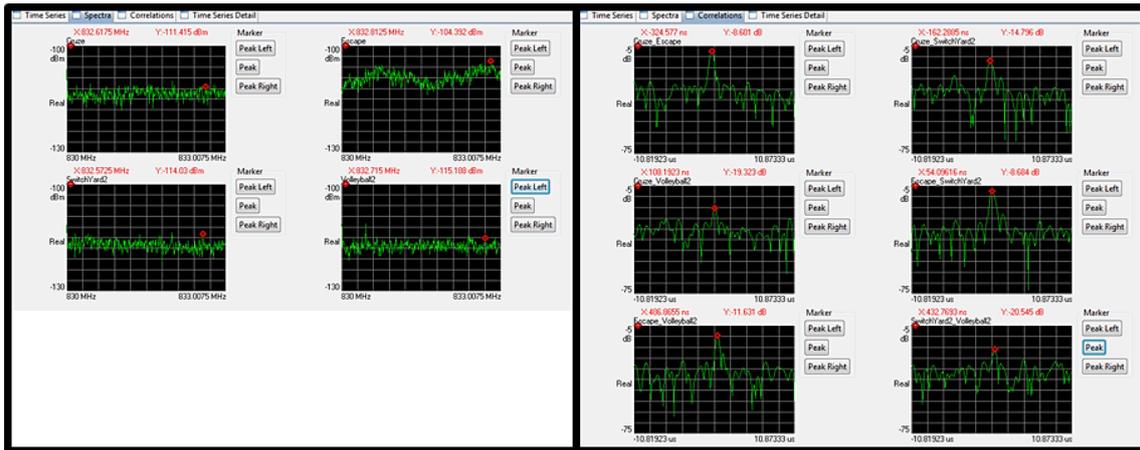


在此情况下，模拟和测量是一致的。

图17（左）显示出该发射源仅仅以正的SNR到达一个监测位置（escape）。但是，采用TDOA对该发射源进行地理定位的能力是非常强的，如在图17（右）中所显示的传感器对良好的互相关性所证实。

图 17

在一个2013年外场试验中测量得到的UMTS装置的典型频谱与相关图



这些模拟和测量的点是要演示射频检测范围与地理定位覆盖区域之间的差别以及影响它们的条件。射频检测范围受到很多不同因素的影响，且受设计选择和站址选择限制的影响。地理定位覆盖区域受到射频检测范围构成的限制所影响，但随着地理定位的方法（即，AOA、TDOA、POA等）而变化。这些在选择地理定位和一个监测站站址定位时都是重要的考虑。

## 6 结论

在用于大城市和工业中心时，TDOA网络可能更加有效，在那里可以安装大量的传感器，使得监测过程可以自动化，包括发射机地理定位功能。

相比之下，相对小的城镇和它们的相邻城郊以及孤立的工业中心可以通过少量分开相对大距离的DF或混合AOA/TDOA站来更加有效地发挥作用。在此情况下，采用仅仅二个站对完成发射机的地理定位是有效的。

采用任何固定地理定位或检测技术对在整个城区上所有信号活动进行检测不是现实可实现的。监管部门通常优先考虑监测特定区域中和在重要的特定时间/事件期间的部分频谱。部署在必要时能够以迁移和重新配置的灵活性来满足主要需求的一个系统在当今的频谱环境中是至关重要的。

根据区域的条件部署正确的监测站类型将会使站的数量最少，而覆盖和效率最大化。例如，在没有大型反射器的开放乡村中，AOA或AOA/TDOA（混合）站将是高效率的。但是，在密集的城区或拥挤的混合环境下，紧邻的反射器密集地充斥了城市的街区，采用一个也可以使用POA和混合地理定位算法能力的TDOA网络可以是更加有效的。

## 附件2

### 对混合AOA/TDOA监测站地理定位精度 和覆盖区域的仿真研究

#### 1 引言

本附件基于来自现实计算机模拟的结果，比较了混合AOA/TDOA无线电监测站与独立AOA和TDOA系统的地理定位精度。

此研究采用计算机模拟来对从支持实现混合AOA/TDOA技术的无线电监测站得到的精度和覆盖区域进行建模。与基于单独AOA技术或单独TDOA技术的站相比，这些模拟显示出一个混合AOA/TDOA系统在由这些监测站所环绕的区域之内及以外可以采用较少的站提供对所关心区域更大的覆盖，并且增加地理定位精度。

#### 2 地理定位方法

典型的地理定位处理结合了来自多个站点的测量，来产生对发射源位置的一个估值。定位估值的质量由误差距离来界定（以m为单位）。较小的误差距离表示一个较好的定位估值。

随着发射源的密度增加，一个频谱监测/DF系统准确地理定位发射源的能力变为一个重要的特性，特别是当涉及干扰问题时。

有很多不同的可用地理定位处理方法。此处讨论的是三种不同的地理定位方法。第一种方法将来自多个采用定向天线阵列来确定AOA的站点的AOA测量结合起来。第二种方法将来自最少三个TDOA站点（地理定位要求三对TDOA测量）的TDOA测量结合起来。第三种方法将AOA和TDOA测量的混合结合起来进行地理定位处理（最少需要二个站点：一个具有AOA和TDOA测量能力，另外一个具有TDOA测量能力）。为了简化，这三种方法被称为AOA、TDOA和混合AOA/TDOA。

请注意，一个具有AOA测量能力的监测站被称为AOA站点；一个具有TDOA测量能力的监测站被称为TDOA站点，而一个具有AOA和TDOA测量能力的监测站则被称为混合AOA/TDOA站点。

这三种地理定位方法的主要特性列举在以下表1中。

（关于TDOA系统的优点和限制的更加详细的讨论请参见ITU-R SM.2211报告。）

表 1

地理定位系统特性	仅仅AOA	仅仅TDOA	混合AOA/TDOA
地理定位所要求的最少站点数量	2个站	3个站	2个站，混合AOA/TDOA。 一个站可以是仅仅TDOA
地理定位精度	随着到监测站距离的增加而线性地减少	在TDOA站之间近似恒定 在TDOA站以外的区域迅速恶化	在混合站之间区域与TDOA相同 在站点以外的区域与AOA类似
精度随着到发射源的距离增加而降低	是	仅仅对在TDOA站以外区域的发射机	仅仅对位于离开混合站很远的发射机
与信号调制无关	是	TDOA对未调制的信号不起作用 对窄带信号困难	是，如果至少有二个混合站点
数据通信要求	低，10-30 kbit/s	中到高，120 kbit/s –2 Mbit/s	如果仅仅采用AOA，可以像AOA一样低；或者如果同时使用AOA和TDOA，略微高于TDOA
选址限制（参见第3章）	较大的天线可能较难安装，有可能限制了站点的可用性	简单全向天线，易于安装	对混合站与AOA相同
天线复杂性	多单元天线	单个天线	多单元和/或单个单元天线
校准要求	有时（取决于AOA系统） <sup>6</sup>	否	有时（取决于AOA系统）

如此表所示，每种方法都有很多优点和缺点。在一个特定的应用中（城区/城郊、永久/临时、平坦地形/山区等），对部署的要求将决定最佳的配置。

<sup>6</sup> 一些AOA系统自我校准并且不要求进一步的校准调整，除非进行了修改。

### 3 采用一个特定实例对地理定位精度进行的模拟

已经在巴西的Belo Horizonte城中和周围对地理定位的精度进行了一个详细的计算机模拟。模拟了包括AOA、TDOA和混合AOA/TDOA的不同频谱监测系统（SMS）配置，并且对结果从期望的地理定位精度特性的角度进行了比较。

该模拟是采用一个软件工具来进行的，它将地理定位计算与所考虑的不同站点目标信号的可测性结合起来，基于发射机功率和采用3维地形的信号传播效应。该模拟包括对站点数量、接收天线高度、发射源天线高度和其他参数的特定假设，如表2中所给出。

表2  
在所介绍的计算机模拟结果中使用的参数

中心频率:	450 MHz
信号带宽:	25 kHz
发射机输出功率:	10 W或1 W（有效发射功率）（见正文）
发射天线高度:	10 m（平均地形之上）
接收天线高度:	30 m（平均地形之上）
接收天线增益:	0 dB
接收机噪声指数:	12 dB
接收机处接收到的SNR:	+10 dB
以指定SNR接收的最少站数:	对AOA和混合式是2个站， 对TDOA是3个站

注 – 除非在表中另外表明，相同的参数被用于所有地理定位技术：AOA、TDOA和混合。

地理定位精度是在误差距离的基础上计算的。

### 4 指定的软件分析工具

对此实例，完整的软件工具包括以下模拟：

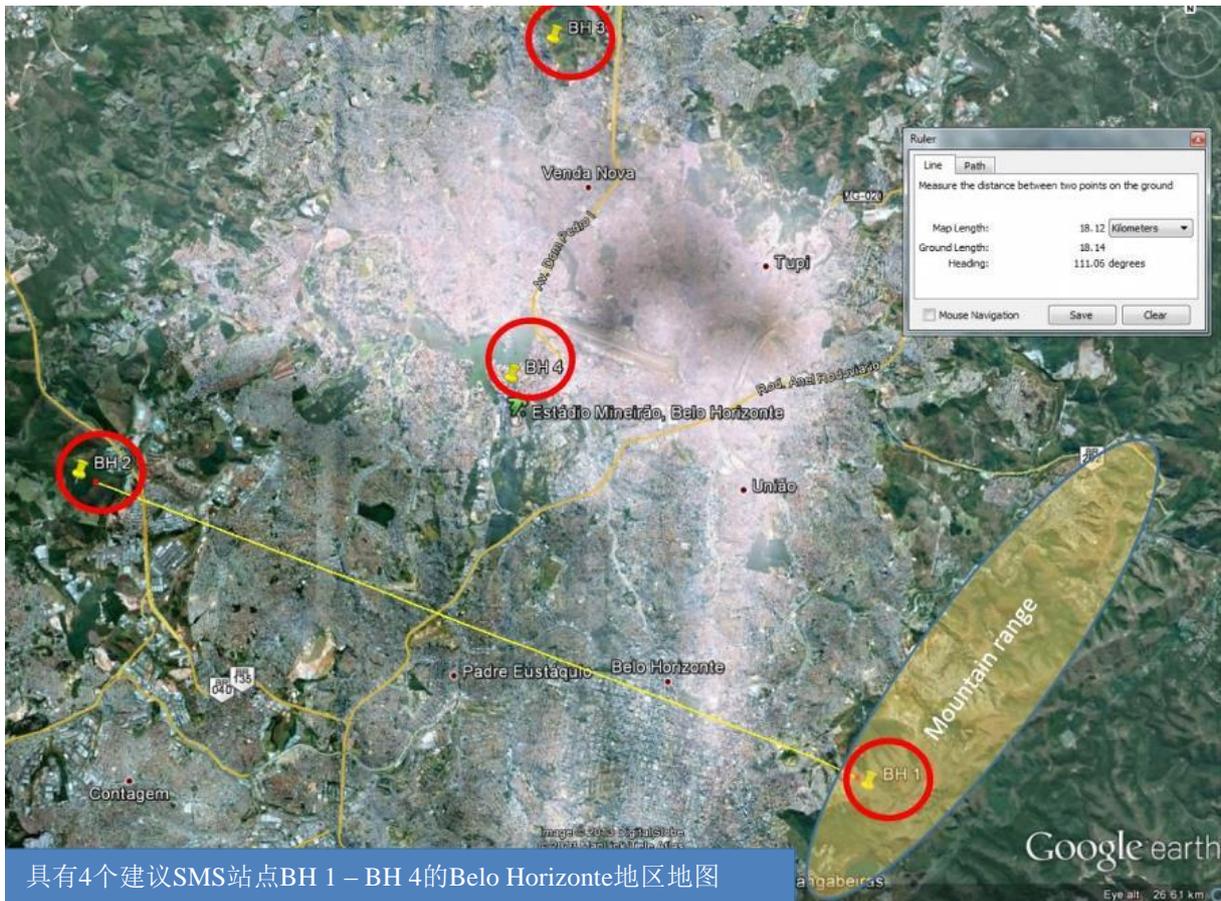
覆盖 – 覆盖分析显示能够接收（“听到”）发射源以不同的功率电平从特殊的位置发射的站点数量。

地理定位精度 – AOA、TDOA和混合AOA/TDOA地理定位精度分析显示了不同地理定位方法的性能。

系统配置的优化 – 本分析显示了不同地理定位方法要达到可比地理定位精度所需的站点数量。

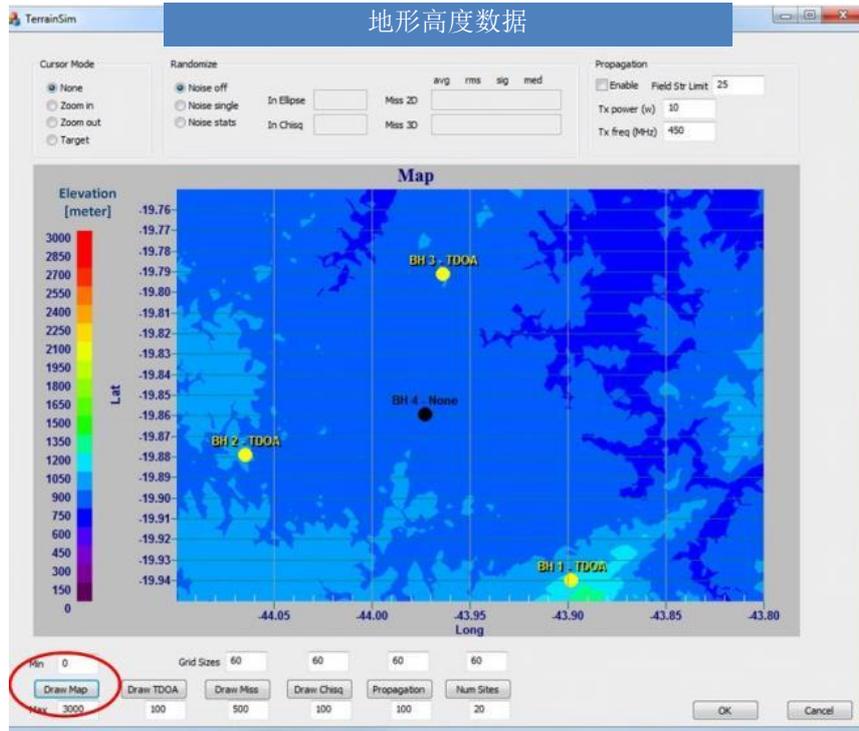
#### 4(a) 地理位置的实例

下图在谷歌地图上在Belo Horizonte中和周围显示了为了分析而选定的4个站点的位置，并被标记为BH1、BH2、BH3和BH4。站点间隔大约是18 km，且地形相对平坦，除了靠近BH 1站点的山区边缘。



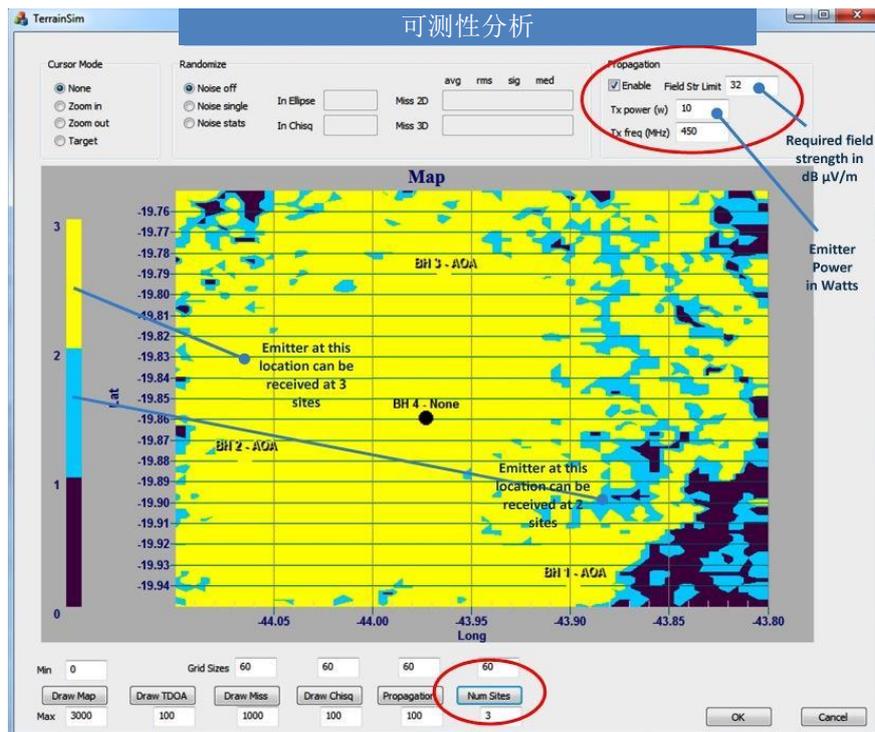
#### 4(b) 地形高度数据的实例

以下所示的屏幕显示是地形高度数据。同时显示了带有名字的4个站点位置及其地理定位能力。在这个实例屏幕显示中，所有站点选定具有TDOA能力。在传播和地理定位计算中都用到地形数据。



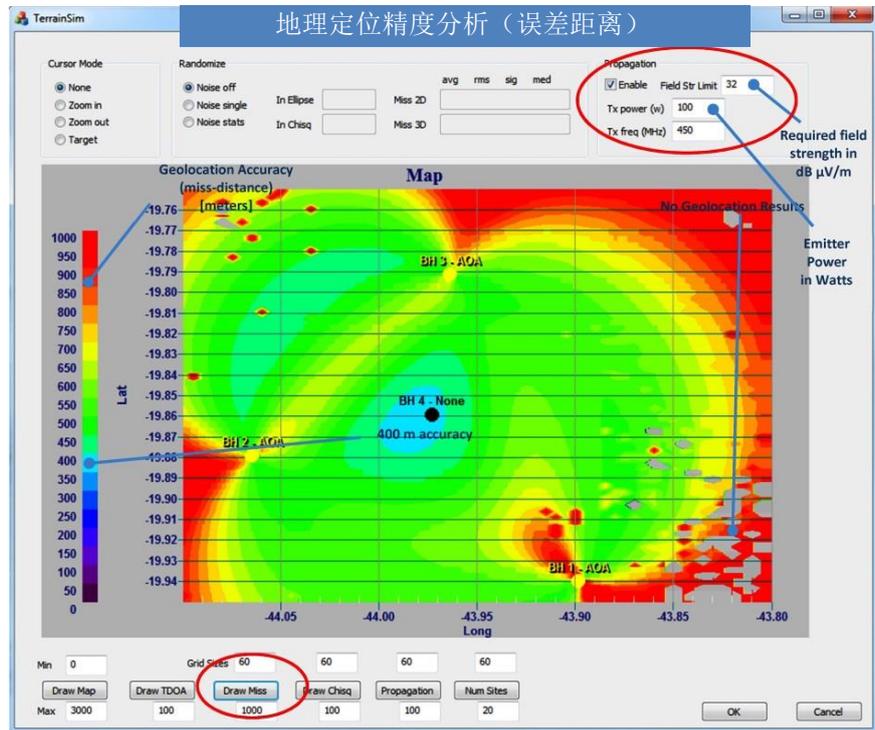
#### 4(c) 可测性分析实例

下一个屏幕显示标示出了“可测性”等值线。在这个屏幕显示中，彩色编码标示了能够以要求场强接收发射源信号的站点的数量。这个屏幕显示包括了地形高度变化和发射机功率电平的影响。在此实例屏幕显示中，所有站点选择具有AOA能力。



#### 4(d) 误差距离图的实例

下一个屏幕显示以误差距离（以m为单位）的形式显示了定位精度等值线。同样，误差距离是对特定的要求场强进行计算的。在此实例屏幕显示中，所有站点都选择具有AOA能力。

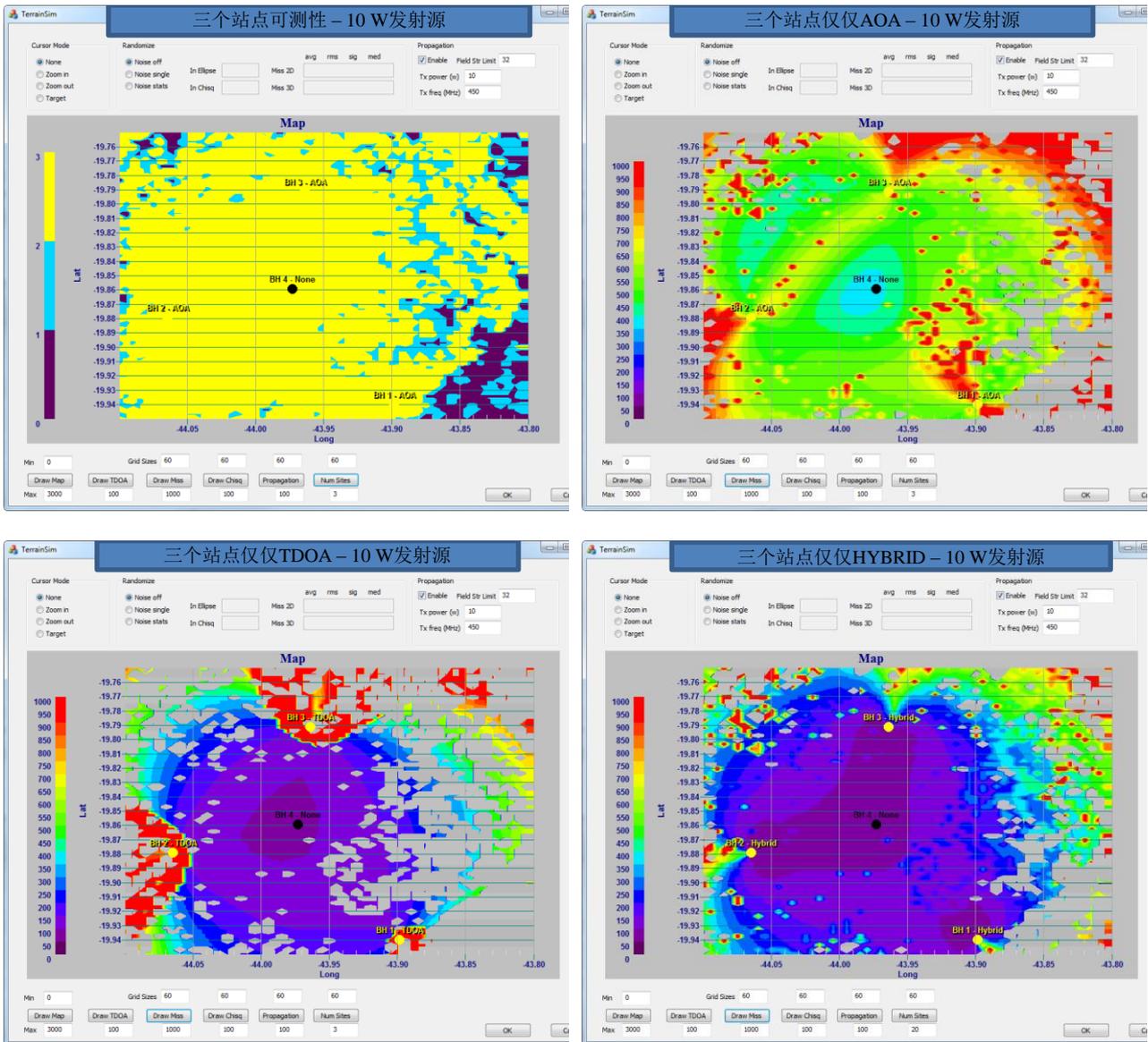


## 5 模拟的结果

此案例研究是在各种条件下进行的，例如包括在频谱监测网络中的站点数量、发射机功率在不同传播条件下在1 W和100 W之间变化、以及不同的地理定位技术。以下段落对在此研究中采用10 W和1 W场景推导出来的主要结果进行了小结。

### 5(a) 3个监测站的网络

下图介绍了对一个10 W发射机情况下AOA、TDOA和混合AOA/TDOA地理定位系统的比较。第一个图显示了3个站点中每一个对一个位于整个涉及区域之上的10 W发射机的可测性。



### 5(b) 模拟结果（3个站）的小结

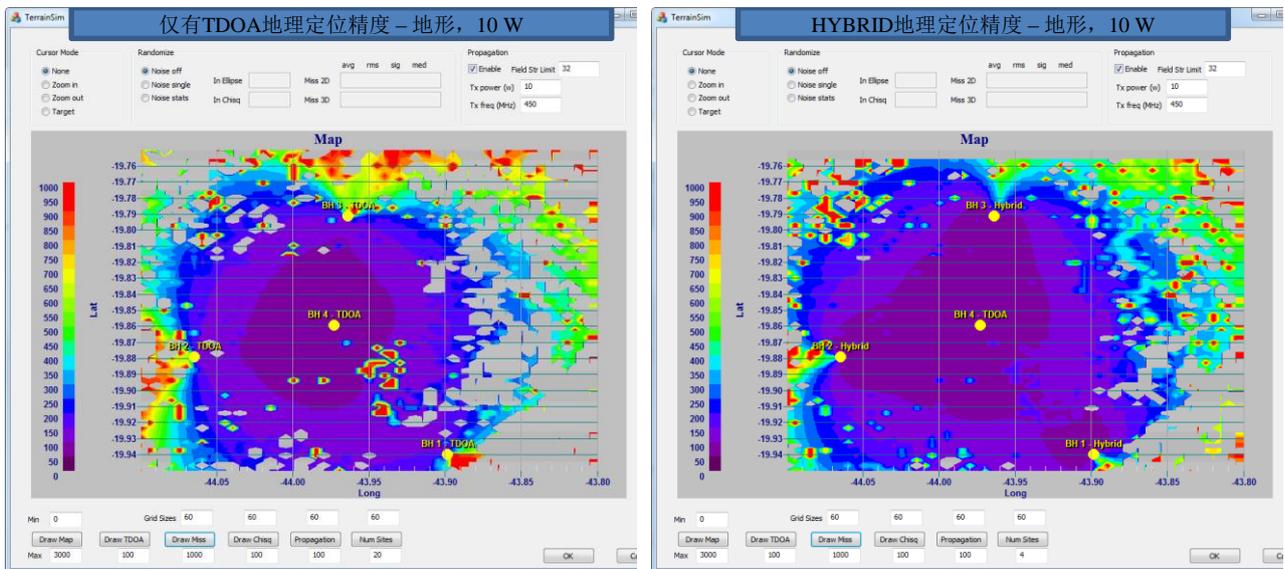
由三个AOA站构成的一个系统覆盖了整个涉及的区域，但是地理定位精度对远距离发射机很差。但是，即使只有一个站截听到发射机，AOA站也可以提供方位线。

由三个TDOA站构成的一个系统在由观测站所圈定的区域中提供了较好的精度。但是，如所预期的，地理定位精度在此区域之外劣化。在本模拟中，还有较大的间隙（灰色区域），其中无法指望得到地理定位结果，因为TDOA地理定位覆盖部分取决于站点的几何分布以及间隔距离。如果仅仅三个TDOA站被用在这个间隔距离（18 km）或者如果发射源不足以靠近至少一个站，1 W或更低的发射机的覆盖如所预期地降低。这个模拟假设最少三个站要求正SNR。它不考虑任何与本底噪声相关的能力(AOA和TDOA都能采用相关性技术以仅仅一个站具有正SNR产生一个结果)。

对于此实例，期望一个采用了AOA和TDOA技术的混合系统在更大的覆盖区域上有更好的地理定位精度。

### 5(c) 4个监测站的网络

下图介绍了对一个10 W发射机情况下基于TDOA和混合AOA/TDOA站系统的地理定位结果的比较。



### 5(d) 模拟结果小结（4个站点）

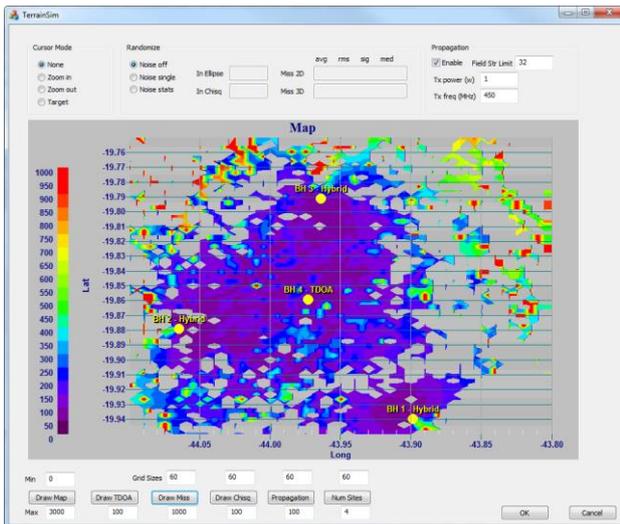
一个有4个站网络的结果与有3个站所得到的结果一致，但是具有改善的覆盖结果。采用仅仅TDOA站在由这4个站所环绕的区域中提供了很好的精度，但在此区域之外地理定位精度劣化。还有一些间隙（灰色区域），其中无法得到地理定位结果。采用4个TDOA站，对1 W或更低的发射机的覆盖降低（出于与在3个站情况中所讨论的相同原因）。

如同在3个站的实例中，此模拟显示出一个采用AOA和TDOA技术的混合系统可以在一个更大的覆盖区域上提供更好的地理定位精度。

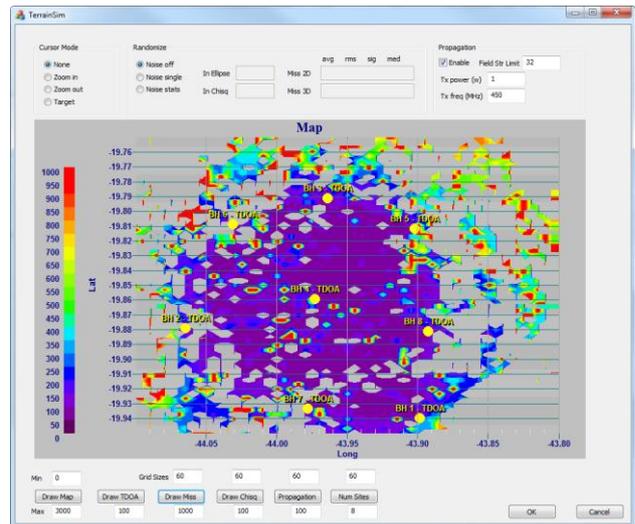
### 5(e) 在网络中站数的比较

在前面段落中的讨论显示出一个采用AOA和TDOA技术的混合网络的覆盖区域可以大于同等数量的仅仅TDOA站的覆盖区域。为了量化实施一个混合AOA/TDOA系统的效益，对于一个1 W发射机的情况，已经对提供等效于一个3个混合AOA/TDOA站加上1个TDOA站网络的覆盖所要求的仅仅TDOA站的数量进行了建模。

在下图中，左侧模拟了4个混合站，而在右侧模拟了8个仅仅TDOA站。



4个站点HYBRID (3xHYBRID + 1xTDOA)



8个站点仅仅TDOA

基于这个计算机模拟，为了达到相同或更好的覆盖和相同或更好的精度，预期一个混合AOA/TDOA地理定位解决方案比一个仅仅TDOA地理定位解决方案要求更少的站。基于在此模拟中的假设，一个采用AOA和TDOA技术的混合系统可以提供较低的装置成本和较低的日常成本。因为每种情况是不同的，应对覆盖要求、地形、站址限制和表1中的其他因素给予仔细的考虑，以对一个特殊应用确定最佳的安排。

## 6 结论

基于计算机模拟，一个混合AOA/TDOA地理定位解决方案可以提供很多超过TDOA和AOA系统的优点。在介绍的实例中，一个组合AOA/TDOA解决方案以较少的监测站址位置提供了更好的覆盖。

## 附件3

### 关于TDOA系统与现有 AOA系统一起使用的研究

#### 1 序言

基于TDOA的网格监测<sup>7</sup>具有先进的频谱监测功能和发射源定位，为复杂环境提供合理的覆盖。但是，TDOA和AOA系统各有利弊。与TDOA和AOA系统一起使用互为补充，克服了两种系统的不足

2016年在日本东京启动了使用TDOA和AOA传感器的简单检测的实验项目，研究这一互补性监测系统的有效性。

#### 2 目的和测试场景

该项目的目的是根据两个系统的优缺点研究TDOA系统与现有AOA系统的最佳配置方案。

##### 2.1 TDOA和AOA传感器共址

把TDOA传感器放置在东京湾区的现有AOA传感器的同一地点，用以确定测试发射源位置。两个系统都用来进行测量。

TDOA传感器被连接到全向天线并使用一个有线LAN网络。

试验中使用一个已知位置的测试发射机信号。

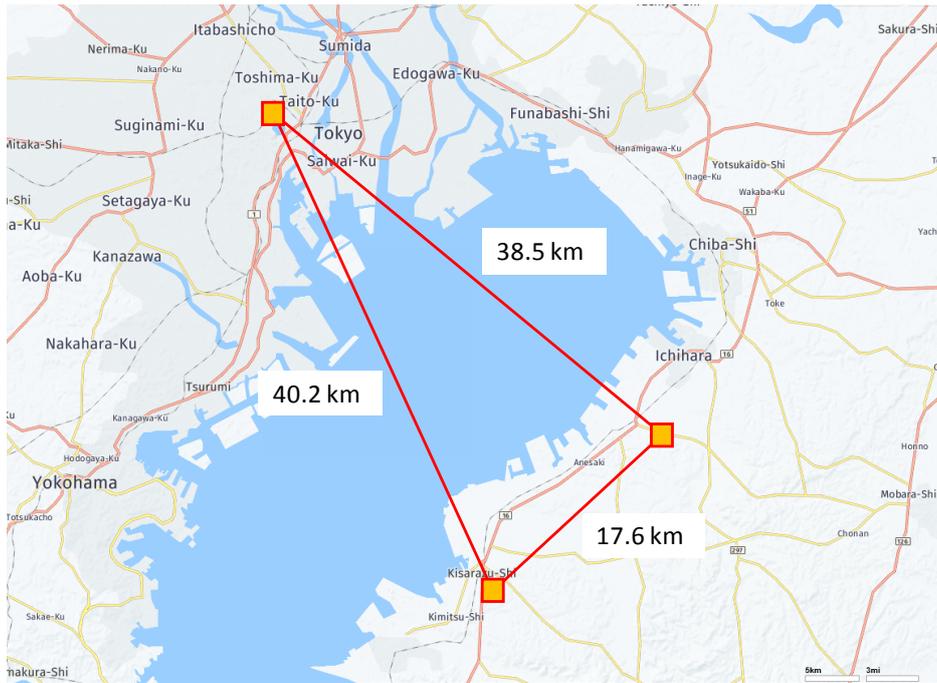
图18表示AOA和TDOA传感器的位置（3个AOA和3个TDOA传感器）。

---

<sup>7</sup> 网格监测由监测传感器、天线和辅助设备组成，检测一个可分割为若干小监测区（网格）的区域。

图18

## AOA和TDOA传感器的位置



## 2.2 固定AOA和移动TDOA传感器间的写作

除非获得两个或两个以上的方位线，否则AOA系统无法估计出发射源的位置，在只可获得一条方位线的情况下，可用过使用移动TDOA系统获取发射源的位置。

为测试起见，在每个AOA传感器的同一地点一次部署一个固定的TDOA传感器。另外，使用一个移动TDOA传感器。

这一监测系统的概念是移动TDOA电台沿着AOA传感器测量的方位线移动。

## 3 结果

### 3.1 TDOA和AOA传感器共址

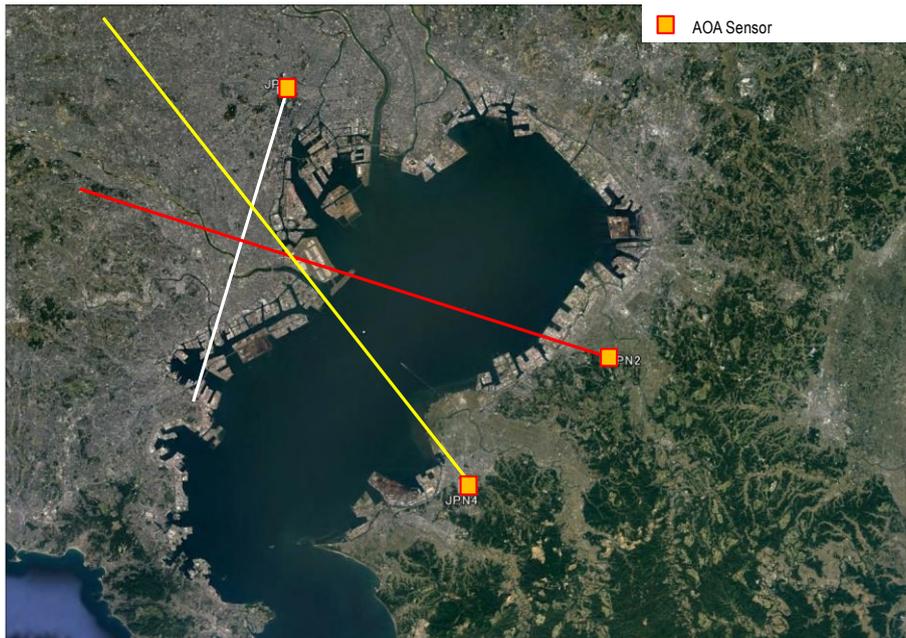
捕捉到一个已知发射源位置的信号后，使用AOA系统估计出发射源的位置。带颜色的线条（如图所示的白色、黄色和蓝色）是利用AOA方法计算出的方位线。在某些测量中，防伪线不是在图19所示的一个点上交汇。

其原因无法确定，有可能是因为临近的反射器或其他波前失真引起的。

在这一事件中，已知的发射源特征如下：

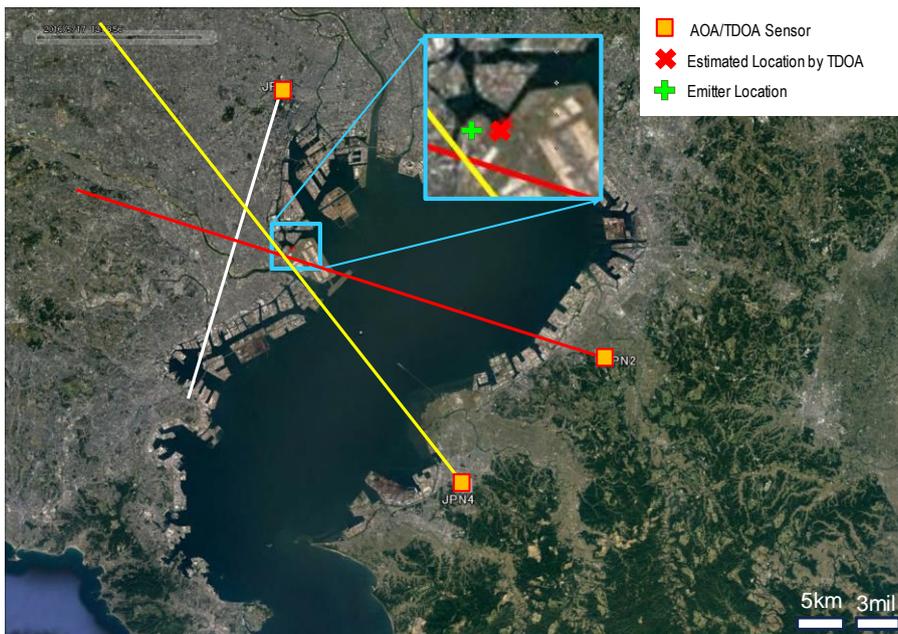
频率	1 020.0 MHz
占用带宽	500 kHz

图19  
通过AOA方法获得的结果



用TDOA传感器捕获同一信号并计算出估计位置。  
为缩小发射源位置范围并尽量减少模糊性，显示出TDOA和AOA的结果。  
图20显示通过AOA和TDOA重叠估计出的位置。

图 20  
通过TDOA和AOA方法估计出的位置



上述结果表明，同时利用AOA和TDOA进行测量可以减少模糊并且/或提高发射源位置测量的精度。

在有些情况下，一个AOA加上两个TDOA传感器可以很顺利的对发射源进行定位。

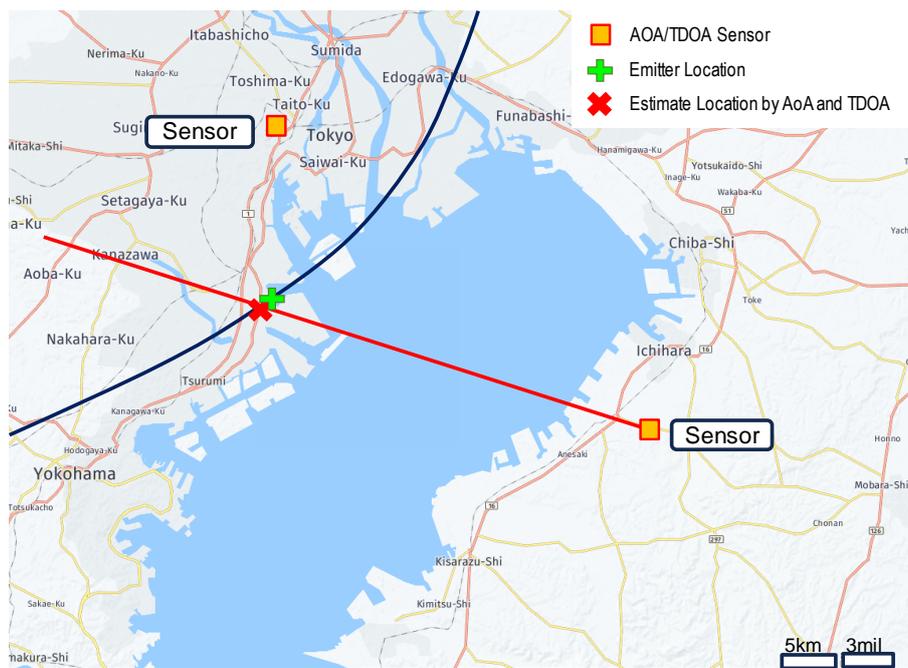
为准确估计发射源的位置，如果单独使用一种方法（AOA或TDOA），则至少需要两个AOA传感器或三个TDOA传感器。但是，由于多路径、障碍物和信号弱等原因，即使有足够的传感器，也不一定能够发现发射源。

为解决这一问题，我们发现即使众多传感器接收的信号电平不是很高，但使用AOA和TDOA相结合的方法仍能够有效估计出发射源的位置。

图21表示用一个AOA电台和两个TDOA电台实际测量的结果。红线是方位线，蓝线是有两个TDOA传感器形成的抛物线。

这表明，一个方位线加一个抛物线可以对发射源位置进行定位。可以从两条线的交汇点获得估计的发射源位置（红色x）。

图21  
一个AOA和两个TDOA传感器的综合结果



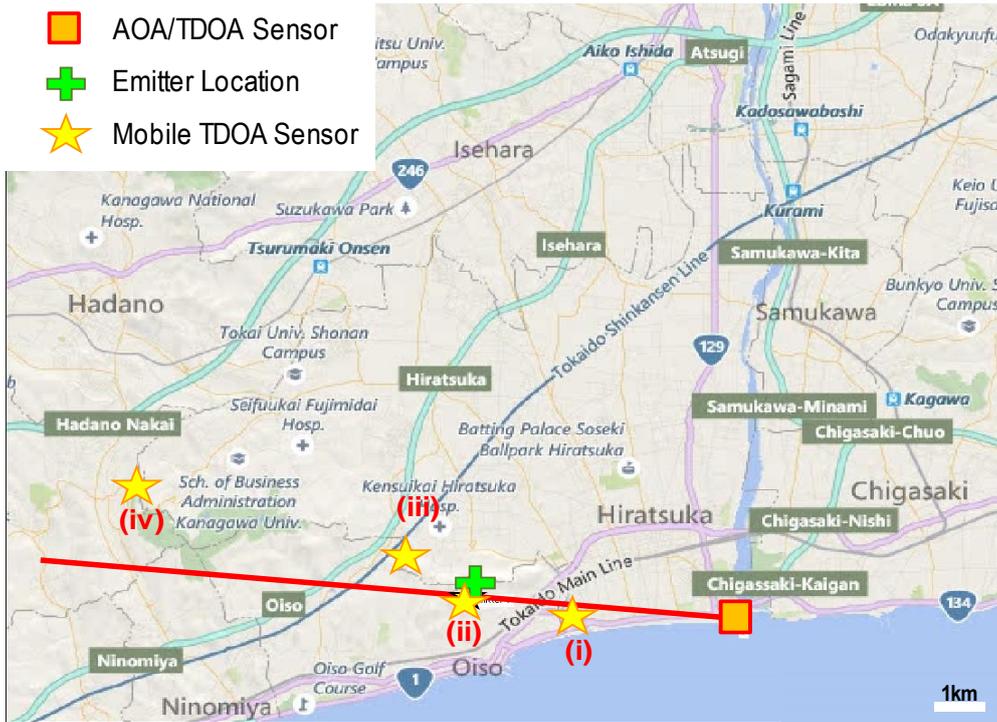
### 3.2 只用移动TDOA传感器加上一个固定AOA传感器

如果从一个AOA传感器获得一条方位线，可以假定发射源在这条方位线上。这种情况下，一个移动的TDOA传感器可以沿着这条方位线从附近的AOA传感器由近及远移动并于位于AOA传感器位置的另一个固定TDOA传感器形成一个抛物线，从而可估计出发射源的位置。

图22对这一概念进行说明。

图22

一个AOA传感器和一个移动TDOA传感器的概念



AOA获得的方位线是图22中的红线。

移动TDOA传感器由近处的AOA传感器位置向方位线远端移动。这样做是为了确定发射源的位置范围（从位置(i)到位置(iv)，如图23至26所示），在每个位置上计算抛物线。

图23、24、25和26表示用一个AOA传感器加两个TDOA传感器估计发射源位置的结果。

图23

在(i)点上估计得位置



图24

在(ii)点上估计的位置

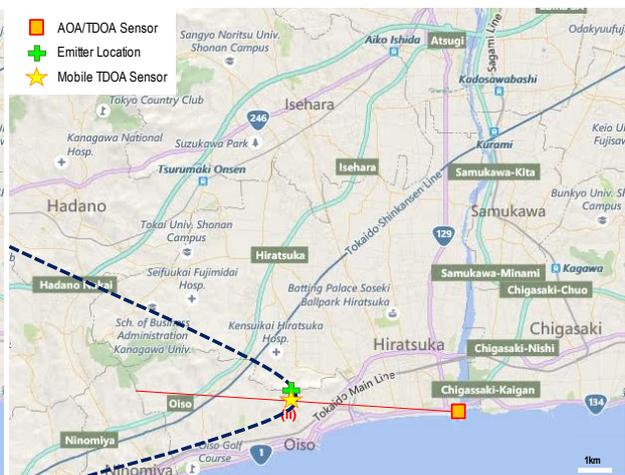


图25  
在(iii)点上估计的位置

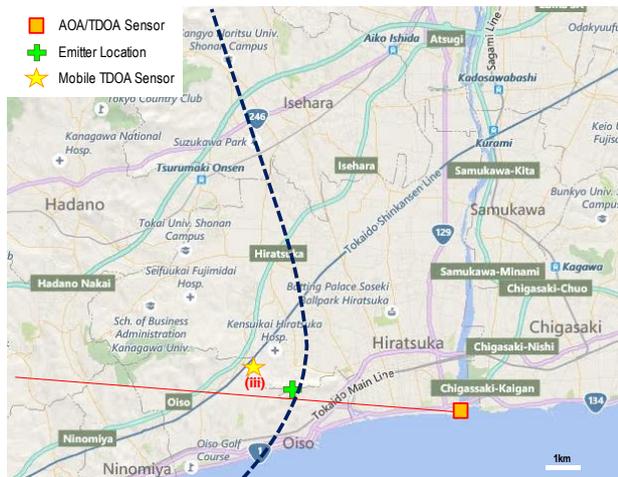
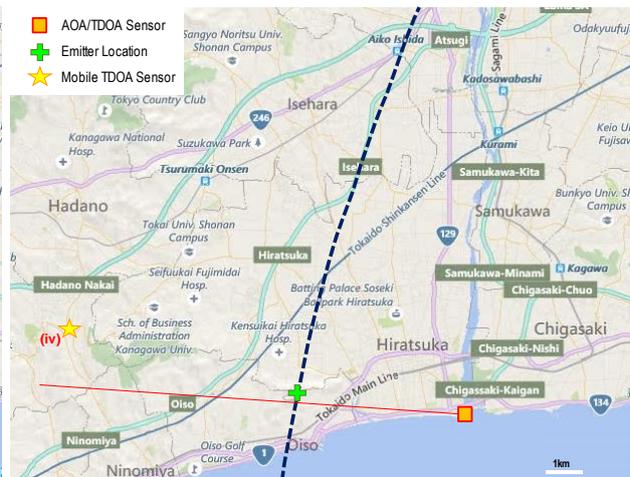


图26  
在(iv)点上估计的位置



在 (i) 点上计算的记过并未显示出一个有效的位置，因为计算的时间差超过了TDOA传感器之间无线电波传输的时间。

图23中TDOA传感器之间的距离为3公里，无线电波传输时间为10 us秒。通过TDOA算法计算出的时间差为9.99 us秒。

这就意味着，发射源位置不在TDOA传感器可以确定的两个传感器之间。

图24中TDOA传感器之间的距离是5公里，无线电波传输时间为16.7 us秒。通过TDOA算法计算出的时间差为16.6 us秒。

(iii) 和 (iv) 点上计算的记过比较理想，因为计算出的发射源位置一直处于两个传感器之间。

图25和26中，TDOA之间的距离分别为6.6公里和12.55公里，无线电波传输时间为22 us和41.7 us秒。有TDOA计算的时间差为11.74 us和-8.42 us秒。

#### 4 结论和未来项目

在已经部署AOA系统的一些地区，TDOA监测系统可以起到补充作用。

本附件展示了如何将TDOA监测系统与现有的一个AOA系统配合使用。因此，可以发现TDOA和AOA配合只用有如下优点：

- 优点1：通过比较TDOA和AOA两者的结果可降低发射源位置估计的模糊程度。
- 优点2：通过把AOA获取的方位线与TDOA获取的抛物线相结合，即使使用少量的传感器也可以估计出发射源的位置。

- 优点3：即使没有一个实际的TDOA传感器网络，通过部署一个AOA传感器和两个TDOA传感器（其中至少有一个移动TDOA传感器）方法，将AOA和TDOA系统配合使用，即可以对发射源进行定位。

本附件介绍的实验是在没有永久性网络连接或TDOA系统没有安装传感器的情况下开展的。

移动TDOA系统可能不会同时在每个测量点收到信号，但是不过将抛物线与AOA结果结合起来便可以对发射源进行定位。

此外，通过增加TDOA传感器的数量可以提高现有AOA监测电台/网络的可靠性。

---