

ITU-R F.752-2* 建议书

点对点固定无线系统的分集技术

(1992-1994-2006年)

范围

本建议书说明了点对点固定无线系统的分集技术。分集技术包括在空间、角度、频率范畴或它们的组合中考虑的那些技术。选择分集、获得或处理分集信号的基本方法已在附件中列出，附件还给出了基于传播数据的实际分集效应。本建议书未涉及使用其它传输介质或可能提高系统可用性的路由/站址分集的分集技术。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 在视距和超视距路径上，频率选择性衰落可能使所接收到的信号失真和强度降低，所以使固定无线系统的性能受到损害；
- b) 应用分集技术有利减少衰落对系统性能的影响；
- c) 在有绕射和超视距的路径上，为了达到满意的性能，必须使用分集接收；
- d) 对在视距、绕射和超视距路径上实施分集的各种技术已经进行了研究，并且已经得到使用；
- e) 采用分集技术可以使视距系统达到高性能，从而有效地利用无线电频谱，
- f) 有关分集技术使用和应用的更多信息可以在ITU-R P.530建议书和ITU-R F.1093建议书中找到，

建议，

- 1 当考虑把分集技术应用于固定无线系统时，应该使用附件1中所提供的资料（见注释1）；

注释1 – ITU-R手册– 数字无线电中继系统也包含将分集技术应用于固定无线系统的相关资料。

* 本建议书应当提请无线电通信第3研究组注意。

附件1

点对点固定无线系统的分集技术

1 获得分集信号的方法

一般最常用的方法有频率分集和空间分集。频率分集是将同一信息在一个以上的微波信道上进行传输。空间分集是信号通过一个以上发射/接收天线的路径到达接收机。要说明采用不同传播方式的不同系统中分集实施方案，必须更详尽地介绍各种空间分集方法。

超视距系统在发射端和接收端都用了分集。它们采用了完全三维的多重分集，天线放置的布局比较灵活，有时还用角度分集。在角度分集中，有时用一个天线形成多个射束或多个方向图。由于散射能量到达接收机的到达角是变化的，因此角度分集提供了相对不相关的信号。

在视距路径上，一般装备空间分集，在接收端用两副天线，这两副天线之间的垂直距离要足够大，从而得到两个多径衰落引起的损伤足够不相关的信号，这里损伤是指信号失真和信号功率损耗。就数字微波的性能而言，信号失真是主要的传播减损，因而引进了一些分集方法，这些方法依赖于主接收天线附件入射电磁场的不均匀结构使信号减损不相关，而不是依赖于大的空间间隔。

在被称为方向图分集或角度分集的这些方法中，分集信号是从第二个天线或第二个射束得到的。这个天线或射束在垂直方向上有不同的方向图或射束宽度和/或俯仰方向有不同的指向角。这些分集方法可以用位于相同高度或相近高度的多个天线来实现或用单个天线的多个馈源来实现，从而允许将分集加到现有的接力段上，而不需要为了分集接收获得足够的路径余隙而提高微波塔的高度。虽然有些研究想把角度分集和方向图分集区分开来，但其它研究把这两个术语相换使用。

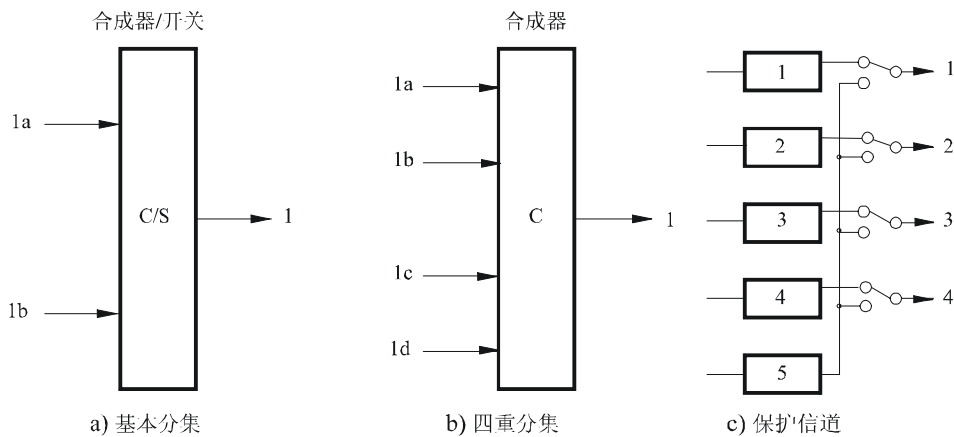
因为任何分集系统的有效性取决于信号中减损的相关性，空间、指向角和频率的位移对于决定系统性能十分重要。

2 处理信号的方法

2.1 配置方案

图1a)和1b)表示了某些数字系统情况下的基本配置方案，它用二个或四个信号得到一个公共输出或判断。虽然，在视距路径中的系统经常用图1a)中采用频率分集来实现1 + 1的保护倒换的配置，但是更常见的方式是几个工作信道使用一个或者有时使用二个保护信道。图1c)表示1 + 4工作时的配置方案，这样的保护方式经常与各个信道上的空间分集工作联合起来使用。在极端情况下，比如有时在有反射的视距路径上所遇到的情况，空间分集和1 + 1频率保护结合在一起使用。传播条件困难的长路径或跨越水面的路径也已经用了四重分集，或者采用四重空间分集的形式，或采用二重空间分集和二重频率分集的组合。

图 1
分集合成的配置



0752-01

2.2 实施时考虑的因素

现在的系统采用在射频、中频或基带频率上的合成器或者用在中频或基带频率上的开关来实现分集工作。这些合成器可以利用等效增益、最大功率或最小色散控制算法。因为传输性能方面的差别不大，设备设计在这些可选方案之间的选择方法一般根据方便或简化的原则决定。一个给定的链路上是否需要加分集要根据所预测的传播条件的严酷程度和根据所传输的信号的特性来决定。

分集是否可以得到的实际改善取决于许多因素，包括带内幅度色散和系统间干扰对信道性能的影响以及实现分集时所采用的算法。

在高速数字固定无线系统中，已经使用了最小色散合成器件（MID），也使用二重分集接收机。在二重分集接收机中，分集信号由最大功率合成（MAP）法处理，而合成信号由自适应均衡（EQ）进行处理。采用MAP+EQ方式会产生协同效应，即误码率大大降低。根据具有MAP+EQ的接收机中所使用的最大功率原理，可以将用于合成空间分集信号的方法分为如下三类：

- MAPEG或最大功率等效增益合成。该方法采用线性相加，它有如下缺点：在其中一个分集信号完全衰落的情况下，在合成器输出端的信噪比要比普通接收机差3 dB。
- MAPEG/SW或最大功率等效增益/开关合成。该方法采用线性相加。当第一个接收机来的输入信号比从第二个接收机来的输入信号弱（ $\sqrt{2} + 1$ ）倍时，就将从第一个接收机来的输入信号切断，因此在合成器输出端，信噪比没有损失。这一方法有如下缺点：当发生倒换时，高速数字系统中，就出现一个引起差错率增加的短暂过程。
- MAPOPT或最大功率最佳合成。该方法不会因MAPEG和MAPEG/SW系统中固有的缺点而受到影响。在MAPOPT系统中，在合成器前面的各分集支路中，包含电子衰减器。该衰减器的衰减自动发生与接收到的空间分集信号的功率比成比例的变化。在

MAPOPT合成器中，当强信号与弱信号的功率比 $\gamma < 7.7$ dB时，就进行线性相加。若发生进一步的衰落，在弱信号路径上，发生与参数 γ 成比例的平滑变化的衰减。与普通接收机相比，MAPOPT信噪比的增益实际上等于最佳相加合成器（最大比例合成或MAR）所定义的增益。

关于在空间分集信号合成中也曾使用过的最小色散合成器件(MID)，可以考虑下面的方法：

2.3 最小比特差错率（BER）或加权策略

这个方法是以接收到的中频（或基带）信号和带内色散进行适当的加权为基础的，以便将比特差错率（BER）降至最低。

可以根据接收电平和信号的带内功率色散（IBPD）对BER函数进行实时估计。估计的BER的优化等效于微波链路接力段中断率的优化。

3 超视距系统中的应用

3.1 分集的类型

现有的系统采用空间分集、角度分集和频率分集，或者单独使用或者组合起来使用，以得到所传输的信号足够不相关的复制品。有关这些技术的应用及其性能的计算等方面更详尽的资料，应参阅ITU-R F.1101建议书。

3.2 合成器的类型

超视距系统一般采用解调后的合成器。按效率的降序排列，合成器的类型有最大比例、等效增益和选择器。等效增益合成可以使设备和维护比最大比例合成简化，而只是适度降低了性能（四重分集约为1 dB）。将等效增益与选择器分集合成器组合在一起，可以使这一差距进一步缩小。采用等效增益合成时，若信号电平差别过大，在弱信号支路中的接收机实际造成总体性能降低；然而，在这种条件下，若将这一支路切断，则总体性能非常接近理想的最大比例合成器。

4 视距系统中的应用

视距路径上的多径衰落会造成功率损耗，在一无线电信道内，功率损失可能有选择性地变化。在某些应用场合，可以把这两个方面，即损耗和色散分别加以考虑。对于调频（FM）和窄带数字信号而言，性能由窄频带或单频功率损耗所控制；而对许多大容量数字系统而言，性能由色散所决定。因为大容量数字无线电系统发展非常迅速，在一给定的应用场合，确定哪一个系统仅对损耗敏感，哪一个系统仅对色散敏感和哪一个系统对两者都敏感十分困难。虽然较高电平的多状态调制必然对色散效应更敏感，但是设备设计上的进步，如使用改进的均衡器带来的进步降低了系统对色散的敏感性。

4.1 单频信号功率损耗考虑的事项

在多径衰落期间的视距系统上，两个垂直分开的接收天线所接收到的信号很少同时出现深衰落。将可以对这样一对天线进行的改善定义为比值 I_0 ，它的分子是从主接收天线来的信号低于衰落储备的时间，而分母是两个天线上的信号同时低于衰落储备的时间。设 P 为高衰落活动月份中无保护的无线电信道中的接收信号值低于某个特定储备的时间百分数。则当使用完善的开关，即它总是选择两个接收到的信号中较强者时，在该链路上空间分集保护信号值低于该衰落储备的时间百分数为 P 除以 I_0 。

总是选择两个接收到的信号中的较强者的理想开关，根据经验，空间分集改善系数对于地面反射可以忽略的路径来说，与衰落电平、路径长度、频率和天线相对增益有关。

由于信号功率相干相加，用合成器得到的改善系数可能大于使用理想开关的情形，但是改善系数取决于控制合成器的方法。对最大功率等效增益合成方法而言，仅控制了输入信号的相对相位，理论上其改善系数为理想开关改善系数的 $3/2$ 。

4.2 色散考虑的因素

在大容量数字系统和单边带调幅（AM）系统中，为了减小色散衰落效应的实际影响范围，分集合成器和分集开关都已得到应用。对应用空间分集和角度分集的场合，对最大功率和最小色散合成控制算法都已进行了研究。为了达到它们的设计指标，合成器将一相对相位移加到输入信号上，并且将它们相干相加；对最大功率合成器，使输出信号功率最大；对最小色散合成器，使输出信号的幅度频率响应平坦。

频率分集的情况下，一般采用基带开关选出比特差错率（BER）低的信号，理想情况下选择无差错的信号。

评价各分集技术对减小色散的效果的依据是在现场试验条件下的系统观察结果或系统部分模拟结果，以及根据衡量线性幅度色散（LAD）或带内功率差（IBPD）的传播测试结果。LAD是信号的功率频谱两个边缘附近所测得的衰落之间的分贝差值；而IBPD是在信号带宽内测得的最大衰减和最小衰减的分贝差值。使用LAD和IBPD这两个参数的依据是现场试验数据表明，这两个量的发生概率和高比特差错率的出现概率之间有相当好的对应关系。

4.3 多载波系统的分集技术

在多载波系统中，有一个以上的载波是经过一个无线电中继器转发的。因此，获得分集信号的方法有几种，比如基于系统的合成（或交换）和基于载波的合成（或交换）。本节主要探讨专门适用于多载波传输的这些应用。

4.3.1 空间分集的信号合成控制方法

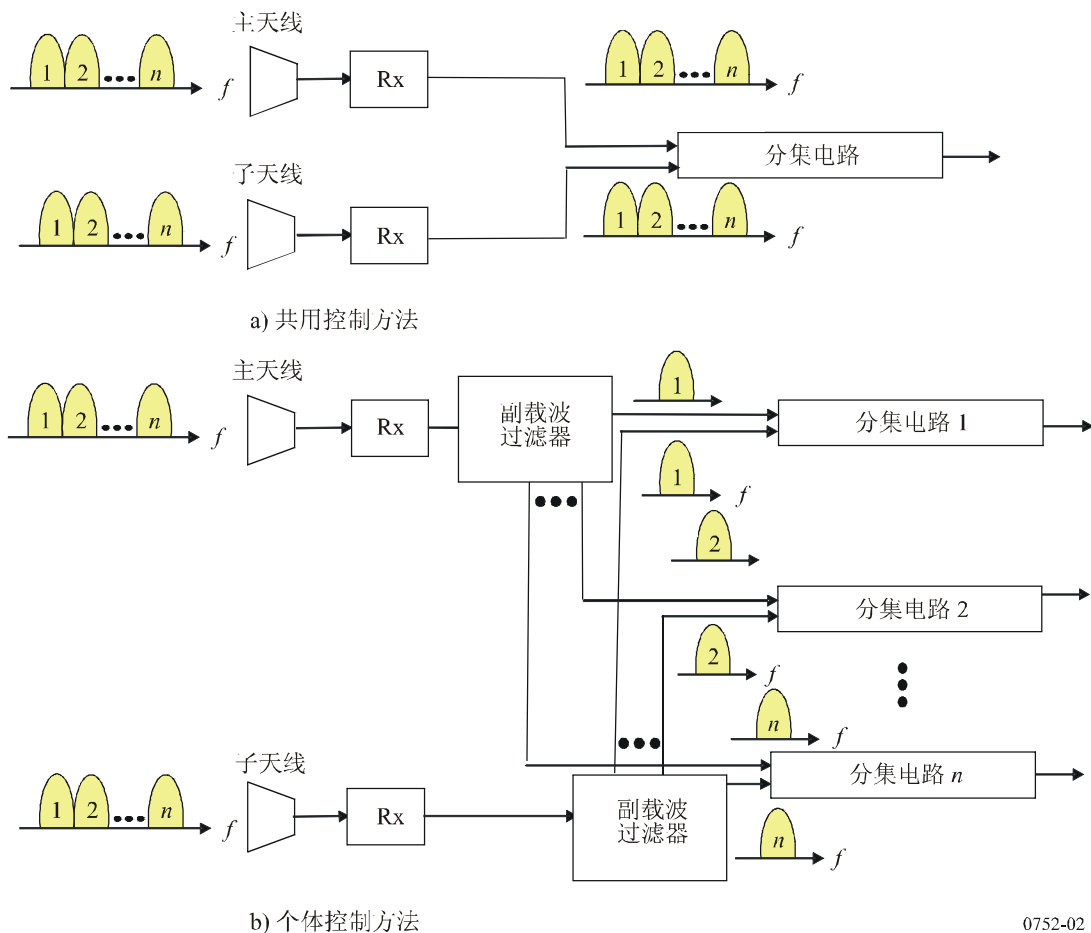
对于多载波固定无线系统中使用的空间分集技术，分集信号合成的控制方法有两种。一种是共用控制方法（根据接收器端的信号总数（图2a））。

在第二种方法中，各个载波分别备有一个分集合成器，如图2b)所示。这一方法能够更为精确地进行信号功率相干相加，从而在多路径衰落效应方面实现优于共用控制方法的更大改善。

共用控制方法的一个优点，是它可以通过相对简单的电路配置实现。然而，大规模集成（LSI）电路的最新技术使得简单经济地实施个体控制方法成为可能。

图 2

多载波系统中空间分集的信号合成方法配置方案



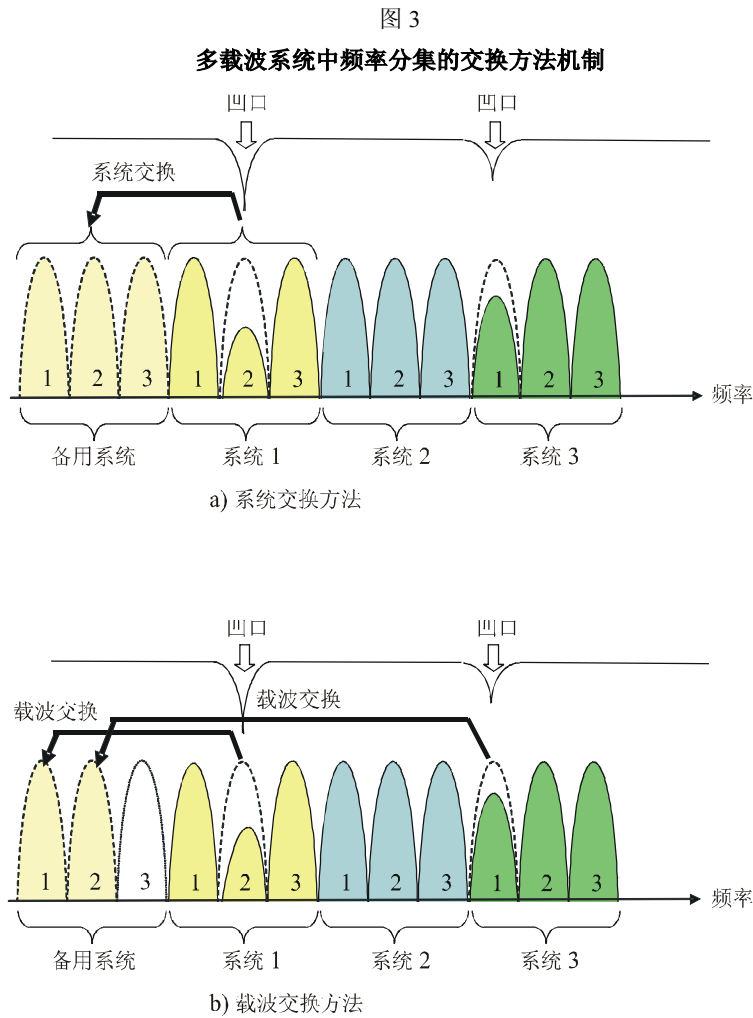
0752-02

4.3.2 频率分集交换方法

图3表示多载波系统可能使用的两种频率分集交换方法。本图的示例假设每个系统有三个载波，图3a)或图3b)分别说明了采用“系统交换”方法或“载波交换”方法的频率分集交换机制。

当发生选频衰落时，衰落触点致使特定载波的接收电平发生下降。在图3a)所示的系统交换情形下，如系统1中有一个载波发生了衰变，则系统的所有载波（载波1、2和3）被转移到备用系统上。因此，另一个衰变载波（见本例系统3中的载波1）不能被转移到备用系统上。

在图3b)所示的载波交换情形下，只将系统1中的衰变载波2转移到备用系统上。不同系统中的其它衰变载波也可进行转移。因此，通过有效利用备用系统中的载波频谱，载波交换方法能够在克服选频衰落的过程中更好地改善总体效应。

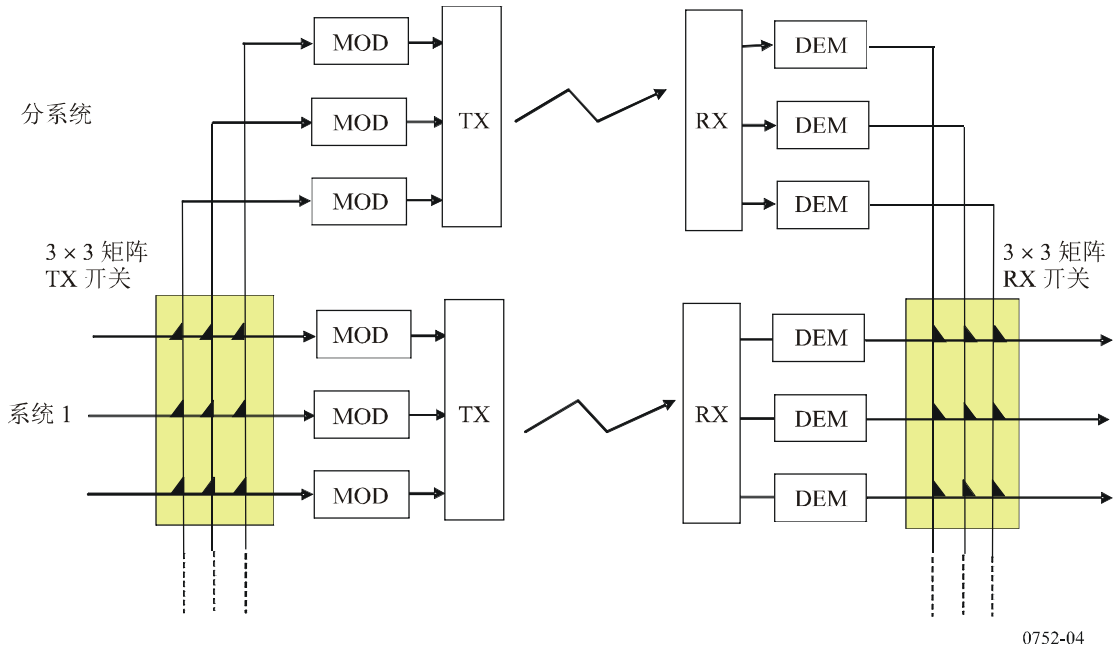


0752-02

图4表示载波交换方法的配置方案。载波信号通过 3×3 的矩阵开关转换，该矩阵开关可以将工作系统的三个载波中的任何一个转移至备用系统的任何一个频率信道。一旦侦测到FEC误差信号脉冲，即开始交换，且交换过程中保持传输信号的同步。

图 4

多载波系统中载波交换方法的配置方案



4.4 从传播数据得到的证据

现有的系统采用空间分集、角度分集和频率分集，或者单独使用或者组合在一起使用，以得到传输信号的足够不相关的复制品。

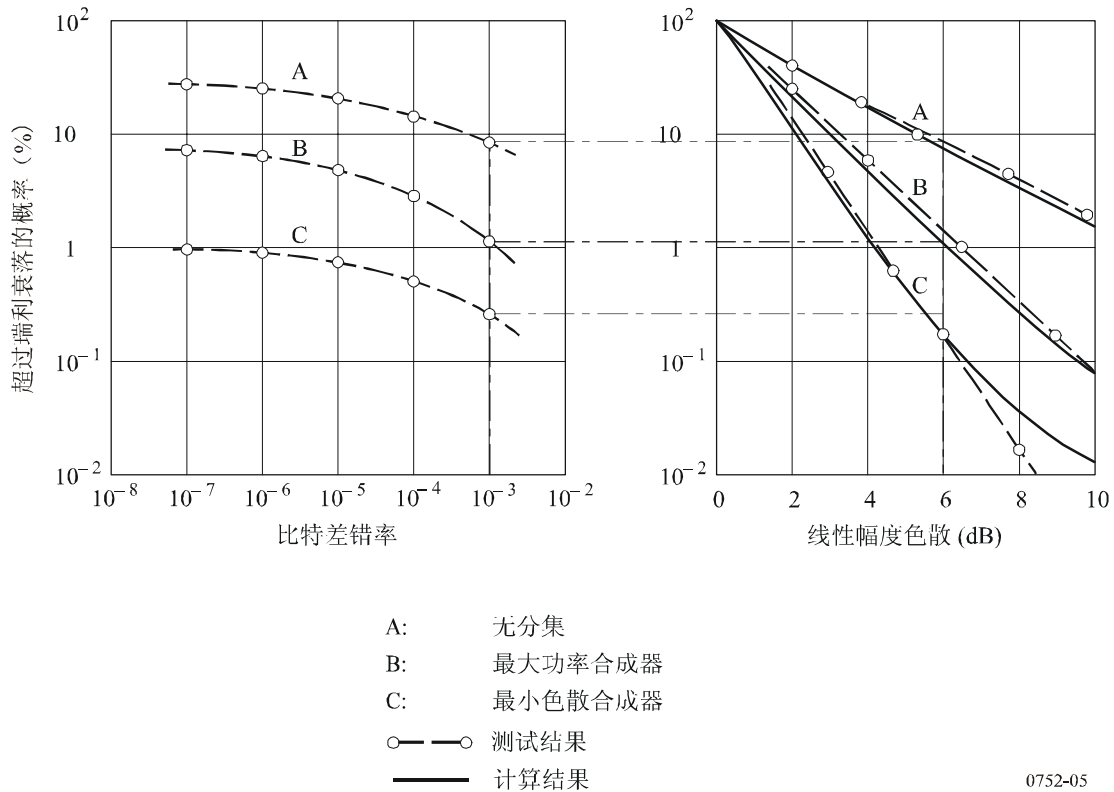
4.4.1 空间分集

在一个试验中，大容量数字微波系统装备了最大功率和最小色散两种合成器。最小色散合成器用测量频谱形状的方法确定频率响应，然而，当合成信号下掉到某个预先设定的电平以下，最小色散合成器的工作情况与最大功率合成器一样。图5同时给出了一个16 QAM系统的计算结果和试验结果，它表示两种合成器和无分集工作时LAD概率的改善。

在工程上，视距固定无线系统的空间分集的天线之间纵向间距一般大于5 m，这是适用单频空间分集改善系数的计算公式可以得出的最小间距（见ITU-R PN.530建议书）。虽然根据这些公式，改善系数随天线间隔的减小而减小，但是结果表明，若两天线的垂直面内的方向图不同，即使天线间隔不大，也会有显著的改善。而且，数字无线电模拟结果表明，即使两个天线是相同的，分集改善也不可能减小到零，这是由于天线方向图与入射场相互作用的缘故。因为方向图的差别对单频改善系数和色散改善系数都有影响，在研究出针对不同情形的改善系数综合公式以前，应该把间隔比较小的分集间距看作方向图分集的一种形式。

图 5

表示单接力段的16-QAM系统上空分集对线性幅度色散概率影响的图（日本53 km的跨海接力段，5 GHz, 200 Mbit/s, 50%滚降因子, 无自适应均衡器）



4.4.2 天线方向图或角度分集

早期研究中采用在一个接收喇叭天线中与两个不同的模式进行耦合的方法实现方向图分集。研究表明，采用开关分集对单频衰落的分集改善不大。在4-PSK数字无线电的同信道交叉极化工作的监测试验中，曾注意到有可能有相当大的分集改善，这是由于发射天线和接收天线的垂直面和水平面方向图之间有差别的缘故。在对一条跨水面长（105 km）路径进行研究的过程中，所接收的信号是7.4GHz上的8-PSK45Mbit/s数字信号，对其功率的测量显示对用双射束天线进行角度分集的改善相当大。有一个试验用了两个轴向相同的不相似的天线边靠边放在一起，结果在降低多径色散（IBPD）的发生概率方面得到比较大的改善。在工作于4GHz的一条45km长的接力段上，用四个垂直排列的射束测量90MHz带宽内衰落的试验结果进一步证明了角度分集的优点。

旨在对大容量数字无线电应用场合下角度分集的效果进行评估的两个传播试验，其结果为角度分集的优越性提供了进一步支持。第一个试验在6GHz上一条长60km的路径上进行，在正常大气条件下，已知该路径有强地面反射。用双射束天线实现角度分集，角度分集提供和电压及差电压作为一对分集信号，而两个射束的输出作为第2对分集信号。为了比较，在主天线下面12.8m处装了一副3m圆锥喇叭天线，以便同时监测空间分集的性能。用最大功率合成器得到分集信号，并且通过衡量三个频率处的接收功率监测衰落。在合成器输出端的

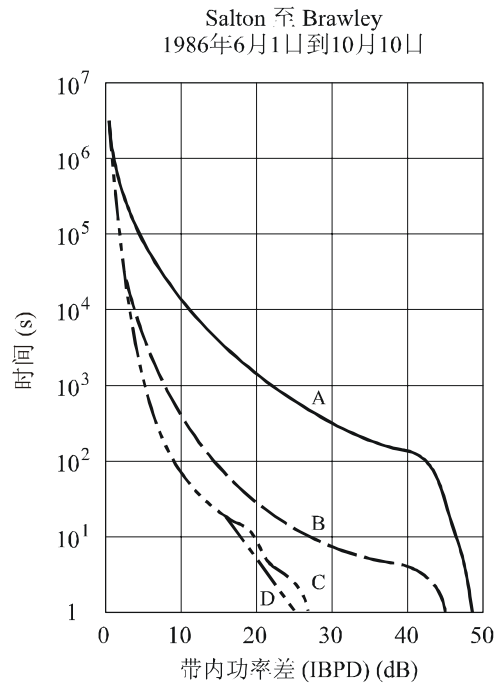
IBPD的分布（图3）表明，在试验期间，用任何一种角度分集信号时出现的IBPD经常比用空间分集输入信号时要小。在后来的一段时间内，在该路径上采用角度分集使64QAM数字无线电的中断时间减少400倍左右。

图 6

表示采用最大功率合成器的角度分集和空间分集对带内功率差的出现率影响的分布图

（在 30 MHz 频带的三个频率点测试）

美国在 6 GHz, 一条有地面反射的 60km 的路径上测试



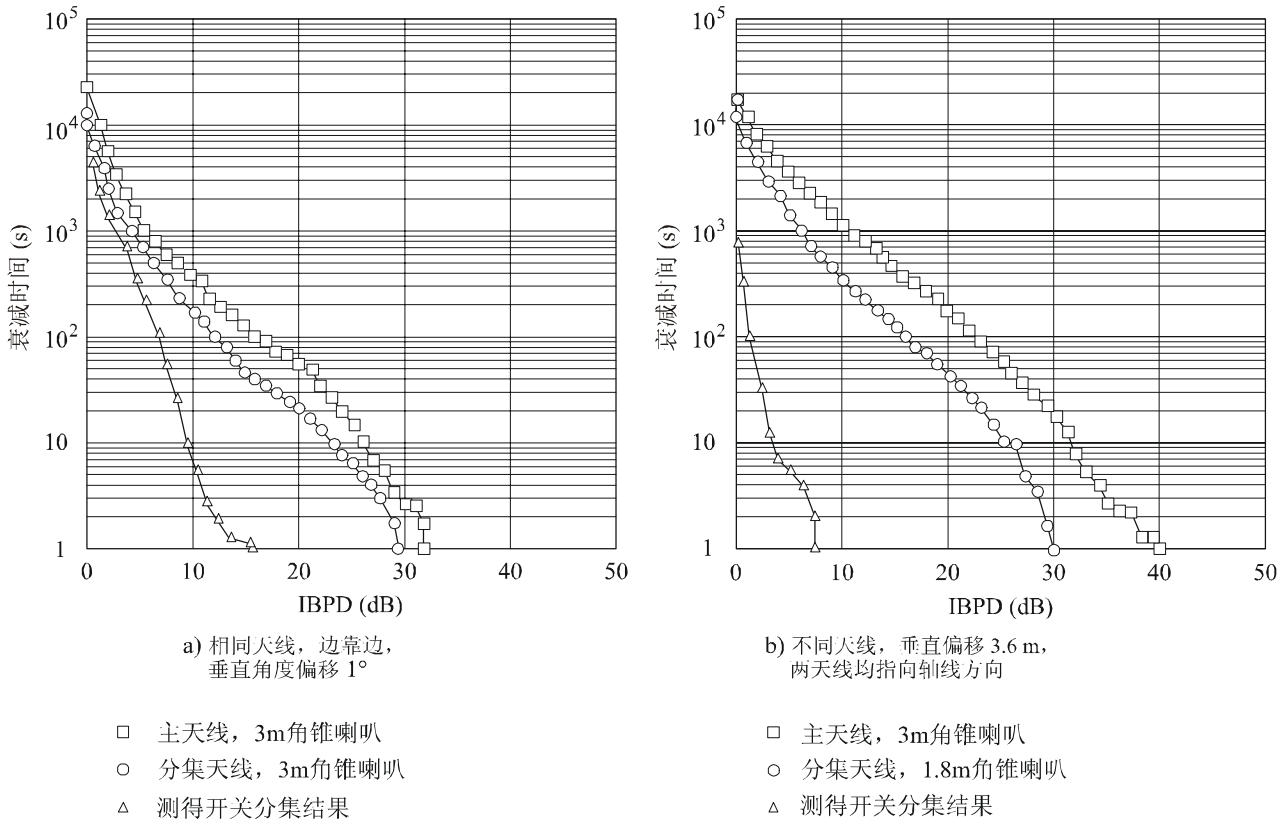
- A: 主天线, 3m圆锥喇叭
- B: 在主天线下方12.8m处装3m圆锥喇叭分集天线的合成器
- C: 用2.4m双馈源天线的和及差信号合成器
- D: 用2.4m双馈源天线上下射束信号合成器

0752-06

作为一系列确定相同的或不不同的天线有小的角度偏移和空间位移对佛罗里达州的一条 38km 长的路径的影响的试验的一部分，在一次测试中作了角度分集试验，试验中将两个相同的 3 米的角锥喇叭天线边靠边安装。该系列试验的另一个试验中，分集信号是从放在紧挨着塔上主天线下面一个比较小的（1.8m）第 2 个天线上获得的。在 6GHz 频段的 30MHz 频带内，监视了 16 个频率处的接收功率，以确定衰落特性。图 7 表示了两种配置方案中带内功率差（IBPD）出现概率的时间统计。虽然两种方案都显示 IBPD 出现时间有显著的减少，但是在这个试验中，采用垂直间隔的方案会导致时间减少得更多。

图 7

表示对靠近美国佛罗里达Gainesville的一条35km 6GHz路径上
带理想（最小色散）开关的分集对带内功率差
(30MHz频带内16个频率上测试)
出现率影响分布图



0752-07

将角度分集和空间分集进行比较的许多传播试验提供了更多有用的资料。在靠近 Darmstadt（德国）的一条55 km的路径上的衡量结果以及靠近英格兰东部的一条51 km的路径上得到的类似结果都表明，空间分集的性能比角度分集好。在靠近德克萨斯（美国）州 Richardson的一条47.8 km路径上的测试结果表明，空间分集比角度分集优越取决于角度分集的配置方案。低端射束指向正常入射到达角的双射线天线的性能比射束交叉指向该到达角的双射束天线要好得多，而且采用和差信号配置也比双射束安排要好，其性能几乎与空间分集一样好。同时进行的气象测量得出的数据也支持这些结果。

在美国阿拉巴马和密西西比做的一些试验将角度和方向图分集与空间分集作了比较。从每一地点的一个衰落季节得到的结果也表明，有一个天线的指向高于正常到达角的这种双天线配置性能优越，并且空间分集的性能比角度分集好。在这种情况下，空间分集性能好的原因是无线电衰落储备的差别和这些接力段上衰落色散特性的差别。根据这些试验及其它试验的结果可以得出以下结论：在数字无线电性能主要由色散效应决定的场合，角度分集和空间分集性能相当；但在性能主要由热噪声决定的场合，空间分集是更好的选择方案。

瑞士在一条124 km长的接力段上作了6 GHz的试验，该接力段有来自日内瓦湖的强反射。试验结果发现角度分集的改善系数极高，而空间分集的改善系数稍低一些。

荷兰在为期两年的试验中发现，若其中一个射束指向低于正常到达角，双射束角度分集的功能改善要高一些。用这个配置方案，在7个可比较的接力段上测得的改善系数几乎与空间分集的改善相同。

4.4.3 频率分集

试验证据表明，频率分集为克服影响数字系统的色散提供了比克服影响窄频带FM系统的功率损耗更为有效的对抗措施。在一组试验中，传播测试是与频率分集改善系数的测量结合起来进行的。这组试验是在美国乔治亚州从亚特兰大到帕尔曼多长42 km的路径上工作于6 GHz频带的16 QAM、90 Mbit/s的数字无线电系统上进行的。通过处理在中间频率相隔60 MHz的信道上工作的两个数字无线电系统的比特差错率的发生率，作为带有理想开关的1 + 1频率分集配置的输入，1980年和1982年的数据表明：在比特差错率为 10^{-3} 时，频率分集改善系数分别为100和45。这一分集改善系数与同一路径上用同样的无线电设备天线间隔为9 m的条件下测得的空间分集改善系数相当。相比之下，对衰落储备在30到35 dB之间的模拟FM无线电系统，用基于单频衰落的标准技术预测的改善系数为9。

美国怀俄明州一条长100 km的路径上作了一个试验，该系统是6 GHz 1 + 1结构的90 Mbit/s数字无线电系统，试验结果同样表明数字无线电系统的频率分集改善系数超过FM系统的预测值10倍。

在使用3+1多径开关系统的频率分集配置方案的评估试验中，实现了接近5的中断降低系数。试验设备包含了安装在一个接力段上的11 GHz 140 Mbit/s QPSK数字无线电系统。然而更典型的情况、即保护一个多接力段系统的5 + 1开关的情形，其频率改善似乎相对较小。

4.4.4 四重分集

为了在困难的路径上特别是跨水路径上满足高级数字通道的差错性能指标和可用性指标，澳大利亚开展了对四重分集的研究工作，或者按四重空间分集，或者按双重空间分集和交叉频带频率分集实现四重分集，研究工作表明用这一方法取得了某些成功。从两个比较长的跨水路径上测得的改善系数列于表1。

研究还表明，在受中断型衰落影响的一困难的路径上用四重空间分集取得了良好的改善效果。

表 1

改善系数 — 四重分集超过二重分集的改善 — 最坏月份，括号内为典型月份

	实验1 158 km	实验2 116 km
严重差错秒	2.6 (15)	6.5 (29)
性能劣化分	1.6 (10)	6.2 (30)
差错秒	1.4 (7.4)	3.7 (4.5)
不可用秒	2.0 (7.0)	25.0 (>25)

4.5 色散统计

已经发表的许多著作提供了多径衰落的色散效应的统计描述。

在超视距系统领域，已经开发了一种有关线性幅度色散的非分集分布和分集分布的理论估算方法，该方法假定各个幅度呈瑞利分布。更近期的一项研究工作开发了在最大功率和最小色散合成器的输出端线性幅度色散超过一个临界值的概率的预测方法。

用宽频带三射线模型的频率分集的仿真计算已经用于同步描述一射频频带内所有信道中选择性衰落。对于1 + 1配置，该模型的预测结果与模拟无线电中继系统的应用场合正相反，数字无线电性能改善的趋势是随着两信道间频率间隔减小而增加。
