

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.04.023

智能天线技术在地空通信中的应用分析^{*}

徐彤^{**}

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:总结了现有地空通信存在干扰的模式、途径和干扰抑制方法,重点分析了地空通信采用智能天线技术的优势和干扰抑制效能,同时也探讨了采用智能天线带来系统抗截获、电磁兼容等性能的改善,提出了地空通信应用智能天线涉及的关键技术。相关研究对工程应用有一定的参考价值。

关键词:军事通信;地空通信;干扰抑制;智能天线;空间滤波;波束形成

中图分类号:TN92 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)04-0493-05

Analysis of Smart Antenna Application in Air-ground Communication

XU Tong

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: The interference modes, ways and suppression methods in air-ground communication system are described. The advantages of smart antenna technique and efficiency of interference suppression are analyzed emphatically. At the same time, the improvements of anti-interception and electromagnetic compatibility(EMC) due to adopting smart antenna are discussed. Key techniques for air-ground communication to apply smart antenna are presented. The research in this paper has reference value for engineering application.

Key words: military communication; air-ground communication; interference suppression; smart antenna; spatial filtering; beam-forming

1 引 言

地空通信系统面临日益复杂的电磁环境,各类干扰大量分布于电磁空间中,干扰信号的类型主要有共址干扰、同信道干扰和敌意干扰。面对多种干扰如何保障地空正常通信,各国均大力进行各种通信抗干扰和干扰抑制技术的研究,并取得了丰硕的技术成果。对共址干扰、同信道干扰,通常采用共址滤波^[1]、干扰对消^[2]以及频谱规划等技术手段进行干扰信号规避或滤出;对敌意干扰信号,通常采用直扩、跳频、跳时或它们的组合等复杂扩展频谱技术^[3]进行抗干扰。这些措施多是从电磁信号的频域、时域上采取措施,避开或滤出干扰信号,保障己方通信正常。

智能天线技术利用天线阵列感知各种信号空间

特征的差异,通过自适应算法形成“最佳”波束,增强期望信号,抑制甚至删除干扰信号,达到空域滤除干扰的作用。近年来,随着技术的发展,智能天线正成为增强无线通信抗干扰能力的重要手段。

本文探讨了地空通信系统采用智能天线技术,对系统抗干扰、抗截获、电磁兼容等性能的提升,并提出地空通信采用智能天线应用设计的关键技术。

2 现有地空通信系统应用模型

地空通信系统是以地面台站为中心,覆盖一定区域内多个空中平台,具有多条链路、多种接入方式(频分、码分、时分)、多种抗干扰手段的复杂电子系统。系统在提供一定通信容量的同时,需在恶劣电磁环境下可靠传输各种信息。地面台站主要面临台站内多种无线电设备同时工作带来的共址干扰、同

^{*} 收稿日期:2013-01-10;修回日期:2013-04-18 Received date:2013-01-10;Revised date:2013-04-18

^{**} 通讯作者:xutonghncd@sina.com Corresponding author:xutonghncd@sina.com

信道干扰,以及电子战的敌意干扰,空中平台则主要面临敌方电子战干扰。

由于空中平台的机动性,现有地空通信系统一般采用全向天线,使系统通信覆盖任意方向。接收时无选择接收空间所有信号,包括有用信号和各种无意或敌意干扰信号;发射时将发射信号进行全向辐射,目标方向辐射效率不高,对周边电磁环境也造成污染。

地空通信系统应用模型如图 1 所示。

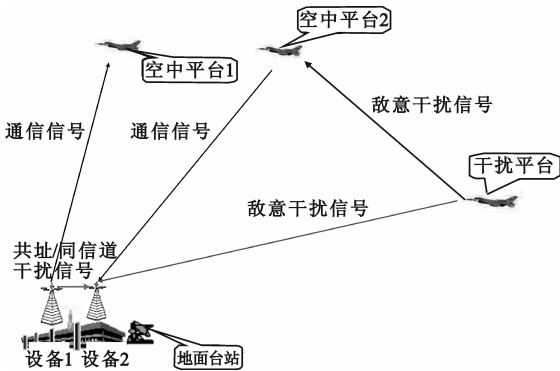


图 1 地空通信系统应用模型示意图

Fig.1 Sketch map of air-ground communication system application

假定地面台站设备 1 与空中平台 1 建立通信链路,设备 2 与空中平台 2 建立通信链路,干扰平台施放敌意干扰信号。空中平台 2 主要受敌意信号干扰。地面台站设备 2 采用全向天线,它除了接收从空中平台 2 来的期望信号外,还可能接收其他两种方式干扰信号。

(1)共址或同信道干扰:设备 1 在给空中平台 1 发送信号的同时,其全向天线将该信号辐射至设备 2 天线,形成共址干扰或同信道干扰。

(2)敌意干扰:干扰平台发射的各种干扰信号。

通常,由于共址设备天线相距较近,干扰信号影响较大,可使设备 2 接收机产生严重降灵、交调,甚至阻塞^[4]。而在码分系统,设备通常占用同一频率信道,设备间形成同信道干扰,会出现明显的“远近”效应。解决共址干扰一般采用每台设备配接滤波器、干扰对消器或分时工作等措施;解决同信道干扰则采用分时工作措施。

敌意干扰信号针对性较强,通常有跟踪式干扰、大功率扫频干扰、宽带阻拦式干扰等,且干扰信号一般较大,以期实现全面电磁频谱压制。通常的抗干扰措施有跳频(FH)、直扩(DS)、跳时(FT)以及它们的组合方式。

3 智能天线技术

智能天线可从空域对电磁信号进行分离、选取^[5],如图 2 所示,接收有用信号、抑制无用或干扰信号,为无线通信提供新的抗干扰手段。

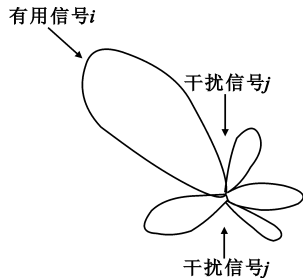


图 2 智能天线方向图示意图

Fig.2 Sketch map of smart antenna pattern

3.1 智能天线结构

智能天线由天线阵、波束形成网络 and 智能算法控制器组成,如图 3 所示。天线阵合路输出反馈至算法控制器,计算得到天线阵的幅度和相位去控制波束成形网络的权矢 w_r ,使天线阵方向图主波束对准期望信号,零波束对向干扰信号,实现信号的空间滤波。

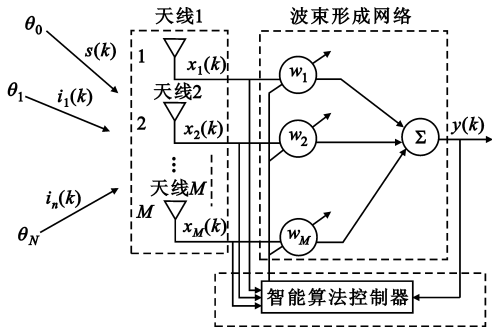


图 3 智能天线组成框图

Fig.3 Block diagram of smart antenna

3.2 智能天线优化算法

智能天线按照一定的准则,优化天线阵的幅度和相位,使天线阵性能满足一定意义上的最佳,常用最小均方误差(MMSE)、最大信干比(MSINR)和最小噪声方差(MNV)^[6]等优化准则。

依据各种优化准则,人们研究了多种自适应波束形成算法,文献[7]给出了最小均方算法(LMS)、递归最小二乘(RLS)、恒模算法(CMA)几种典型算法如下:

$$w(k+1)_{LMS} = w(k) - \mu [R_{xx}w - r] \quad (1)$$

$$w(k)_{RLS} = w(k-1) + g(k)[d^*(k) - x^H(k)w(k-1)] \quad (2)$$

$$w(k+1)_{\text{CMA}} = w(k) + \mu \left[1 - \frac{1}{|y(k)|} \right] y^*(k)x(k)$$

(3)

其中, r 是参考信号与天线阵列接收信号相关输出的期望值, μ 是迭代计算的步长。

LMS 算法的特点是实现简单, 计算量低, 但其收敛速度受相关矩阵特征值分散度的影响, 通常收敛较慢。RLS 算法收敛较快, 但计算量比 LMS 大。LMS、RLS 属于非盲算法, 它们需要一个参考信号或训练序列进行优化, 需占用一定的系统资源。CMA 属于盲算法, 它利用信号恒模特性构造出优化算法, 无需先验知识是其优势。非盲算法相对盲算法而言, 通常误差较小, 收敛速度也较快。工程上可根据实际需求和应用情况来选取上述算法。

4 智能天线在地空通信中的应用分析

地空通信应用智能天线技术, 可在不显著增加系统复杂度情况下, 滤除干扰, 提升系统抗干扰能力, 同时, 增强系统抗截获能力、扩充系统容量、降低设备发射功率以减少电磁环境污染, 即可以提升系统的综合性能, 使系统凸显“智能”、“灵巧”特性。本节重点分析智能天线对地空通信系统的性能提升。

4.1 提高系统抗干扰、抗截获能力

4.1.1 系统抗干扰能力分析

在地空通信系统中智能天线应用示意如图 4 所示。

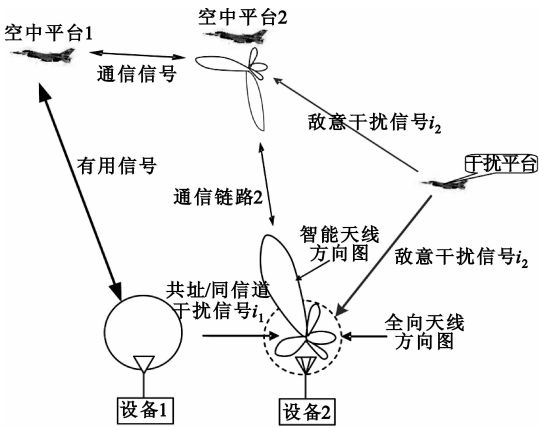


图 4 智能天线在低空通信系统应用示意图
Fig.4 Application sketch map of smart antenna in air-ground communication system

设地面台站设备 1 采用全向天线, 设备 2 采用智能天线。空中平台 2 采用智能天线。以设备 2 和空中平台 2 形成的地空通信链路 2 为分析对象。设备 1 发射对设备 2 形成共址或同信道干扰 i_1 , 干扰平台对设备 2 和空中平台 2 产生敌意干扰 i_2 。

通信链路 2 采用了智能天线, 可以将天线阵的零点对准 i_1 、 i_2 , 一般而言将这两个干扰信号抑制可达 30 dB^[10] 以上; 还可以将天线阵方向图的峰值点对准有用信号 s , 则 s 相对于全向天线而言产生 10 dB 左右附加增益。

设备采用不同天线形式, 系统抗干扰能力分析如表 1 所示。

表 1 地空通信采用不同天线形式抗干扰性能对比
Table 1 Comparison of interference suppression performance using different antenna in air-ground communication

链路	天线形式	对有用 信号增益 G_{AG}/G_{AA}	对共址/同 信道干扰 空间隔离 L	对共址/同信 道/敌意干扰 抑制 A_G/A_A	链路输入 信干比	辅助措施
地面 接收 链路	设备 1 全向天线 设备 2 全向天线	$G_{AG} = 0$ dB	34 dB	0 dB	$\frac{s}{i_1 - L} = \frac{-50}{40 - 34} = -56$ dB $i_2 \ll i_1$, 分母 i_2 忽略。	共址滤波器; 干扰对消器; 频管分时
	设备 1 全向天线 设备 2 智能天线	$G_{AG} = 10$ dB	$L = 34$ dB	$A_G = 30$ dB	$\frac{s + G_{AG}}{i_1 - (L + A_G)} = -16$ dB $(i_2 - 30) =$ $-70 \ll [i_1 - (L + A_G)]$, 分母 $(i_2 - 30)$ 项忽略	频管分时
	设备 1 智能天线 设备 2 智能天线	$G_{AG} = 10$ dB	$L = 34$ dB	$2A_G = 60$ dB	$\frac{s + G_{AG}}{i_1 - (L + 2A_G)} = 14$ dB $(i_2 - 30) =$ $-70 \ll i_1 - (L + A_G)]$, 分母 $(i_2 - 30)$ 项忽略	-
空中 平台	空中平台 2 全向天线	$G_{AG} = 10$ dB	-	0 dB	$\frac{s + G_{AG}}{i_2} = \frac{-90 + 10}{-30} = -50$ dB	FH DS + FH
接收 链路	空中平台 2 智能天线 设备 2 智能天线	$G_{AG} + G_{AA}$ $= 20$ dB	-	$A_A = 30$ dB	$\frac{s + G_{AG} + G_{AA}}{i_2 - A_A} = \frac{-90 + 20}{-30 - 30}$ $= -10$ dB	FH DS + FH

表中,共址干扰空间隔离

$$L=32.45+20\lg f+20\lg d \tag{4}$$

式中, L 为电波传播空间损耗, 设电波频率 $f=100\text{ MHz}$, 天线距离 $d=15\text{ m}$, 有用信号 s 到达天线 2 强度为 -50 dBm , 设备 1 发射信号 i_1 强度为 40 dBm , 设定一个较强的敌意干扰信号 i_2 , 到达空中平台 2 及地面设备 2 天线处强度分别为 -30 dBm 、 -40 dBm 。

由表 1 分析可知:

(1)若地面台站两副天线都采用全向天线,其接收端信干比为 -56 dB 。对共址干扰,采用滤波器可以改善信干比约 40 dB ,依靠电台的选频能力可改善约 30 dB ,两种措施同时采用可保障设备正常工作;对同信道干扰,在滤波器改善 40 dB 的基础上,还必需依靠干扰对消改善 30 dB ,设备才能正常工作,否则要用频管分时措施;

(2)若地面台站设备 2 采用智能天线,其接收端信干比可达 -16 dB 。还需采用共址滤波器、干扰对消器或频管分时措施之一设备才能正常工作;

(3)若地面台站两副天线都采用智能天线,带来约 70 dB 信干比改善,无需其他辅助措施,设备可正常工作。地面台站采用滤波器难以达到这一的效果,目前 VHF/UHF 频段允许 500 kHz 频率间隔共址工作的系统,尺寸较大的腔体滤波器也只能达到约 40 dB 干扰抑制作用。理论上讲,共址工作设备都采用智能天线,可允许各设备同频工作,这无疑将大大降低该类系统频率规划和频率管理的工作难度;

(4)空中平台采用全向天线,当遇到 -30 dBm 强干扰时,在原有抗干扰体制(DS/DS+FH)有 40 dB 处理增益情况下,设备不能正常工作。若空中平台采用智能天线,在原有抗干扰体制下,获取附加 40 dB 空域滤波效果,设备在 -30 dBm 强干扰时可在较高信干比下可靠工作。

可见,智能天线能够明显提升系统抗干扰性能。

4.1.2 系统抗截获能力分析

空中干扰平台都装备有大量的电子侦察设备,侦察设备捕获识别对方的通信信号特征作为干扰设备施加干扰模式的依据,故通信系统抗截获也是一个重要的电子战能力。目前,通信系统常用的直扩(DS)方式,可将信号能量分散到一个较宽的频谱范围,增加了截获的难度;高速跳频方式,也让侦察设备难以捕获信号特征。

智能天线将信号能量大部分辐射向通信目标,

其他方向辐射能量很少甚至零陷。分析表明,采用智能天线可使通信系统在原全向天线基础上将已有的抗截获能力提升 $20\sim40\text{ dB}$,相当于迫使对方侦察设备的灵敏度需提高 $20\sim40\text{ dB}$ 或侦察范围缩小 $10\sim100$ 倍,使己方在电子战中取得一定的优势。

4.2 实现功率控制、改善系统兼容性

采用全向天线的地空通信系统,大多数设备需满功率工作,会给复杂电子系统的电磁兼容带来巨大困难。

若改用智能天线,实现无线信号的定向辐射和接收,有效增强发射端和接收端的信号,在满足系统需要前提下可降低发射功率,减小电磁环境污染。在 4.1 节分析实例中,地空通信双方均使用智能天线时,通信双方各有 10 dB 左右发射功率调整余量,可用于扩大通信覆盖范围;或根据外部干扰情况调整,满足接收信干比要求。

4.3 提高频率复用率,增加系统容量

以民航空管 VHF 通信系统为例。由于机场任务繁忙,塔台管制通常需要以塔台为中心分区管制,如图 5 所示。设塔台分 6 个区域实施管制,每个区域覆盖 60° ,使用一个 VHF 频率,覆盖该区域内的所有民航飞机。这样塔台需要配置 6 部不同频率的 VHF 电台。飞机在起飞、降落过程中要匹配穿越区域的多个频率,如降落 $f_1、f_2、f_3$,起飞 $f_4、f_5、f_6$,则飞机需配备 3 部不同频率电台。目前,民航塔台采用 6 副定向天线,覆盖 6 个分区基本满足需求。未来随着需求增长,塔台分区将扩展至 $9\sim12$ 个,VHF 定向天线方向图已达不到这样高的分辨率。

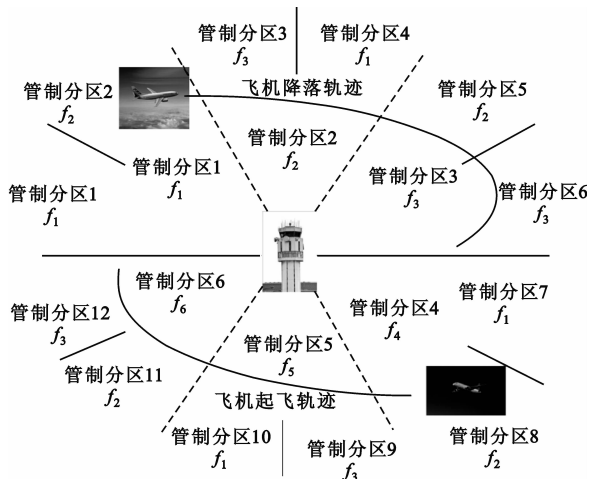


图 5 民航空管采用智能天线前后分区及频率分配图
Fig.5 Sketch map of subarea and frequency distribution
by smart antenna in civil aviation control

采用智能天线可以形成图中外圈所示的 12 个分区。由于分区增多,飞机起飞、降落穿越的分区将多达 6 个,一般民航客机配备 4 部 VHF 电台,无法满足 6 个波道工作。这时,采用智能天线,利用其良好的空间分址能力,可以实现频率复用,用原有的 f_1 、 f_2 、 f_3 覆盖 12 个分区。频率分配如图中所示,频率复用率达到 4。

5 地空通信应用智能天线的关键技术

应用智能天线,地空通信系统可以获得多方面性能提升。系统实施中需重点解决以下关键技术:

(1)期望信号波到达方向(DOA)估计的精度和速度。地空通信传输的是准实时信息,空中平台机动性较大,只有快速准确判断波到达方向,才能有效接收期望信号,抑制干扰信号;

(2)快速有效的波束成形算法。这是决定系统实时性关键,需结合电磁环境、信号传输格式、硬件开销及系统传输开销选取最合适的自适应算法;

(3)多通道硬件一致性。主要指天线阵元方向图和波束成形网络的幅度及相位的一致性,多通道硬件一致性影响波束成形的效果;

(4)适合空中平台的高效天线阵列形式。空中平台安装空间受限,需结合空中波形联合设计天线阵列形式,满足空中平台的安装要求。

6 结束语

智能天线灵活的空间波束调整及自适应信号跟踪能力,使其在民用移动通信领域运用已取得了较大的成功,其研究应用领域正在日益扩大。本文着重分析了智能天线技术应用于地空通信领域,可明显提升通信系统抗干扰、抗截获、电磁兼容和频谱利用率的效能,显示了智能天线在地空通信领域广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 严明,李欣. 美军大型空中通信平台的滤波器应用[J]. 电讯技术,2008,48(6):105-107.
YAN Ming, LI Xin. Application of Filter in US Forces Large Air Communication Platform[J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(6): 105-107. (in Chinese)

[2] Bahu M B, Taylor L L. Tactical Communication EMI/EMC Co-site Problems and Solutions[C]// Proceedings of 1994 IEEE Military Communication Conference. Fort Wayne, IN: IEEE, 1994: 255-260.
[3] 查光明,熊贤祚. 扩频通信[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2002.
ZHA Guang-ming, XIONG Xian-zuo. Spread Spectrum Communications[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002. (in Chinese)
[4] Maiuzzo M, Harwood T, Duff W. Radio Frequency Distribution System(RFDS) for Co-site Electromagnetic Compatibility [C]//Proceeding of 2005 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. [S. l.]: IEEE, 2005: 250-255.
[5] Kennedy J, Sullivan M C. Direction Finding and "Smart Antenna" Using Software Radio Architectures[J]. IEEE Communications Magazine, 1995, 33(5): 62-68.
[6] 王永良,丁前军,李荣锋. 自适应阵列处理[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
WANG Yong-liang, DING Qian-jun, LI Rong-feng. Adaptive Array Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)
[7] Gross F. 智能天线[M]. 何业军,桂良启,李霞,译. 北京:电子工业出版社,2009.
Gross F. Smart Antenna[M]. Translated by HE Ye-jun, GUI Liang-qi, LI Xia. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. (in Chinese)
[8] Winters J H. Smart Antenna for Wireless Systems[J]. IEEE Personal Communications, 1998, 5(1): 23-27.
[9] Martone M. Cumulant-Based Adaptive Multichannel Filtering for Wireless Communication System with Multipath RF Propagation Using Antenna Arrays[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1998, 47(2): 377-391.
[10] Mitola J. 软件无线电体系结构—应用于无线系统工程中的面向对象的方案[M]. 赵荣黎,王庭昌,李承恕,译. 北京:机械工业出版社,2002: 348-352.
Mitola J. Software Radio Architecture Object-Oriented Approaches to Wireless System Engineering[M]. Translated by ZHAO Rong-li, WANG Ting-chang, LI Cheng-shu. Beijing: China Machine Press, 2002: 348-352. (in Chinese)

作者简介:



徐彤(1967—),男,四川成都人,2008年于电子科技大学获工程硕士学位,现为高级工程师,主要研究方向为无线通信技术。

XU Tong was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1967. He received the M. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2008. He is now a senior engineer.

His research direction is wireless communication.

Email: xutongchncd@sina.com