

doi:10.3969/j.issn.1001-893X.2013.08.027

短波信道质量评估技术综述*

杨凯陟**,叶向阳

(空军工程大学 信息与导航学院,西安 710077)

摘 要:短波信道质量评估设备按技术体制分为两大类,分别是独立信道探测系统和嵌入式探测系统。介绍了两类系统的基本原理、目前研究和应用现状以及存在的问题,指出应将两类技术进行结合,根据通信业务进行针对性的信道分析以提高评估效率。最后对其发展方向进行展望,以期短波实时信道估值方面的研究提供参考。

关键词:短波通信;实时信道估值;链路质量分析;频率管理

中图分类号:TN919.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)08-1113-06

A Survey on Channel Quality Estimation Technique
for HF Communications

YANG Kai-zhi, YE Xiang-yang

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: High frequency (HF) channel quality estimation equipment can be divided into two categories according to the technical system, one is independent sounding system and the other is embedded estimation system. This paper introduces the basic principles, research and application situation, and current shortages of two categories of channel estimation systems, and points out that the two kinds of techniques should be combined and channel analysis should base on service in order to improve efficiency. Finally, it provides the development prospects of the technique. It is hoped that all of this can provide a reference for research on real time channel evaluation for HF communications.

Key words: HF communication; real time channel evaluation; link quality analysis; frequency management

1 引 言

短波通信因其具有设备简单、建设维护费用低、抗毁性强、部署快速灵活等特点,在军事通信领域得到了广泛应用,用以传送电报、话音、低速数据等,是实现远程通信有效手段。自 20 世纪 80 年代以来,以美国为代表的西方各国开始重新重视发展短波通信,提出了一系列短波通信标准,进一步提高了建链速度、建链成功率和数据速率,并实现了短波通信网与 Internet 的互联互通^[1],将短波通信推向了数字

化、宽带化和网络化的新阶段^[2]。
但长期以来,信道拥挤、频率资源短缺是制约短波通信发展的重要因素。整个短波频段只有不到 30 MHz 的带宽,加上电离层条件的限制以及电磁环境的恶化,在进行实际通信时的可用频段一般只有几 MHz 到十几 MHz,质量较好的频率则更加稀缺^[3]。随着短波通信的不断发展,短波通信网的规模在不断扩大,短波电台数量急剧增加,使紧缺的频率资源愈发捉襟见肘,互扰现象时有发生。另一方面,经过长期的实地监测发现,即使在可用频带较窄的夜间,仍有 6.6% 左右空闲频率未被使用^[4],说明

* 收稿日期:2013-03-02;修回日期:2013-05-03 Received date:2013-03-02;Revised date:2013-05-03
基金项目:国防科技重点实验室基金资助项目(9140C020102110C0207)
Foundation Item:The National Defense Science and Technology Key Laboratory Fund(9140C020102110C0207)
** 通讯作者:18191918806@163.com Corresponding author:18191918806@163.com

虽然短波信道极为拥挤,但如果采用信道估值、实时选频、动态频率分配等先进频率管理技术,仍可保证通信的可靠进行,最大限度地提高频谱利用率。

作为短波频率管理系统的重要组成部分,短波信道质量评估设备对短波信道进行实时探测,选择适合的通信频段或频点,避免了频率规划和分配的盲目性,因此在短波通信系统中,特别是在军用短波通信领域得到了广泛应用。本文将对各类短波信道质量评估技术进行总结,并对其发展方向进行展望。

2 短波信道质量评估技术概述

自 20 世纪 60 年代末以来,短波信道质量评估系统就开始快速发展并广泛应用,例如美国的 CURTIS 系统、加拿大的 CHEC 系统等。1976 年,美军装备以 AN/TRQ-35CV 为代表的第一代战术频率管理系统,它发送 Chirp 探测信号完成 30 MHz 频率上各种参数信号估算,能分 5 个等级显示 48 个优选频率,使短波通信的可靠性提高了 10 倍以上。80 年代后,短波通信技术进入新的阶段,出现了美国 Rockwell & Collins 公司的 AN/ARC-190CV 系列,具有链路质量分析、信道自动选择、自动链路建立、选择呼叫、信道自动切换等功能。另外,还有美国 Harris 公司的 RF-100 系列,德国 Siemens 公司的 CHX200、德国 AEG 公司的 ARCOTEL 系统, Rohde & Schwartz 公司的 HF-850CALLS,以色列 Tadiran 公司的 MESA 和 HF-2000 等^[5-6]。

综合来看,短波信道质量评估系统可分为两大类:一类是独立的信道探测系统,对整个短波频段进行快速扫描探测,获得整个频段的频率质量排序;另一类则嵌入到通信系统中,在有限的信道上进行链路质量分析(Link Quality Analysis, LQA),形成 LQA 矩阵,为自动链路建立(Automatic Link Establishment, ALE)提供保障。

2.1 独立信道探测系统

与通信分离的独立探测系统是最早投入使用的实时选频系统,以电离层脉冲探测、Chirp 探测为代表,收发双方依靠 GPS 或原子时钟等保持严格同步,发送端在各个频率上发射探测信号,接收端在相应频率上接收探测信号并对其进行分析,估计信道质量。其最显著的优点是可以快速、准确地获得整个短波频段的信道质量状况,具有较高的选频性能。

2.1.1 电离层脉冲探测

电离层脉冲探测是早期应用最为广泛的探测形式,发送端在预定的频点上发射窄脉冲信号,接收端

按照探测计划和程序进行同步接收,对接收信号进行处理可得到电离图或部分信道参数,据此得到信道质量估值。其主要优点是对系统的峰值功率要求较低,且可以获得较详细的电离层结构^[7]。脉冲探测信号的形式可以是简单的窄脉冲,但应用更多的是经过调制的脉冲信号,这是因为窄脉冲具有较宽的带宽,对接收机的性能提出了较高的要求,且使探测过程易受干扰的影响,另一方面,采用脉冲调制可以改善系统的时间分辨特性,提高抗干扰能力。

当发射脉冲宽度足够窄时,接收机得到的就是各信道的脉冲响应函数,将所有脉冲响应函数在频率-时延平面上进行投影可得到完整的电离图,从中可分析出各种传播模式,优选出单模式传播或多径时延最小的频段。另外,可通过测量信号能量、多径展宽、噪声干扰等参数来估计信道质量;对接收信号进行采样,并以当前信道的噪声干扰作为门限进行判别检验,将判别输出进行求和作为信号能量估值;测量接收信号在时间上的散布,根据相关公式得到多径展宽和最大多径时延差;使用噪声接收机或频谱监测仪测量噪声干扰。对测量到的相关参数进行综合分析,计算相应信道的质量等级。

2.1.2 Chirp 探测

Chirp 探测系统是典型的独立频率探测系统,它采用调频连续波(FMCW)进行扫描探测,收发双方在时间上和频率扫描上精确同步,通过比较接收信号与本地信号的频率差来测量信道电离图,具有探测速度快、抗干扰性强、隐蔽性好等优点,已被国际电信联盟推荐为动态频率管理的标准^[8]。

Chirp 探测原理如图 1 所示,典型 Chirp 探测信号是线性扫频信号,收发双方同步进行扫描,并且扫频信号的扫描范围和斜率应保证完全一致。由于信道传播时延 τ 的存在,接收信号与接收端的本振信号之间存在频率差 Δf ,显然 $\Delta f = \tau \cdot df/dt$,因此通过接收信号与本地信号之间的频率差和线性扫频信号的斜率可计算出信号传播时延。当有不同传播模式时,在接收端反映为不同的频率分量,通过检测各频率分量即可直接绘出完整的电离图。例如图 1(a)中根据在 t_1 时刻检测到的 4 组不同的频率分量,即可换算出该时刻所发射信号 f_1 所对应的 4 种传播模式以及传播时延,在一个扫描周期内各时间点上进行分析计算,将得到各个频率下的传播模式和传播时延,即图 1(b)所示的电离图。另外,接收机内部自动增益控制电路的电平变化曲线反映了接收信号强度随频率的变化情况,即信道的频率衰耗特性。

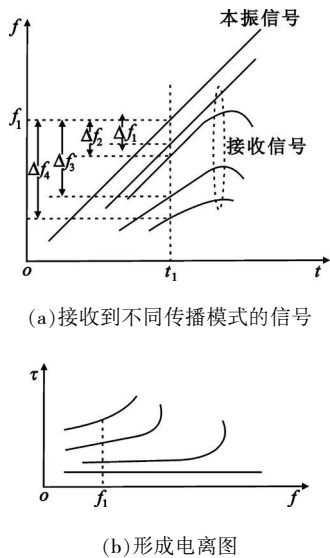


图 1 Chirp 探测原理
Fig. 1 Principle of Chirp sounding

2.2 LQA 技术

现代短波自适应通信系统广泛采用 LQA 技术,在通信前或通信间隙对信道进行质量分析并进行排序,进行 ALE 时,依据 LQA 的排序结果择优选取频率。与独立信道探测系统不同,进行 LQA 花费时间较长,因此通常仅对预置的信道组进行质量分析。

LQA 可分为单向和双向两种,单向 LQA 是指发起呼叫的电台在预置信道上广播探测信号,其他站点利用接收到的信号对信道的连通性、传播特性等进行评价;双向 LQA 需要通信双方对预置信道进行逐个分析:探测发起台首先发射探测信号(发起呼叫),目标台收到呼叫后,对接收信号的质量进行评估打分,将打分结果和探测信号一起发射出去,探测发起台接收到目标台的应答信号并进行评估,将双向链路的分析结果进行综合得到整个链路的评估结果,并将其发送给目标台进行确认。

进行 LQA 时可测量的参数有信噪比、多径时延、多普勒扩展、误码率等,测量参数越多,对信道的评估就越全面,但相应的探测时间随之增加,且设备复杂度也将提高,另一方面,进行 LQA 的主要目的是挑选质量较好的信道进行通信,而不是对信道进行严格的测量分析,因此只需得到能较全面反映信道的几个指标即可,通常测量的参数是误码率(BER)和信纳德(SINAD)。

2.2.1 BER 的测量

美军标 MIL-STD-141A 规定采用统计误码个数方法来估计 BER:对接收到的 3 倍冗余编码进行 2/3 大数逻辑判决,将得到的硬判决序列与纠错译码后的序列相比较得到误码个数,进而估计出误码率^[9]。

该方法只能得到误码率的一个大概估计,为了得到较准确的 BER,需要较长的测量时间,难以满足系统的实时性要求。

伪错监测技术可在准确性和实时性之间进行折衷,其基本原理是人为改变判决门限,使判决门限与调制解调器输出数据之间的判决区域减小,从而增加判决出错(即伪错)的概率。在满足一定的置信度下,监测伪错所花费的时间远远小于统计实际 BER 的时间,将伪错进行外推并加以经验修正,即可得到 BER 的估值^[10]。

2.2.2 SINAD 的测量

SINAD 的定义为

$$SINAD=\frac{S+N+D}{N+D}$$

其中, S 为信号能量, N 为噪声能量, D 为干扰能量。

自适应控制器利用快速傅里叶变换(FFT)计算出信号频谱能量,再将其与无用信号(噪声和干扰)的能量进行比较,得到 SINAD 的数值。

为解决高速数传时 LQA 精度不足的问题,美国 Harris 公司和 Rockwell-Collins 公司分别提出了 ALQA (Advanced LQA) 算法。与 LQA 相比, ALQA 测量的信道参数更多,包括信噪比、时延散布、频率散布、衰落深度、频率偏移等,并且为了解决测量精度与测量时间的矛盾,采用了优中选优的二次选频技术,即首先快速选出信噪比和时延散布满足一定要求的频带,然后在此频段测量频率散布等其他参量^[11]。

3 国内外研究进展

经过几十年的发展,短波信道质量评估技术已经相对成熟,并大量投入使用。近年来,国内外相关研究人员在独立探测体制的基础上进行各种改进,使信道探测无论是在速度还是精度方面均得到了较大提升,并且将短波通信信道评估、天波超视距雷达选频、电离层结构研究等领域结合起来,共同推动电离层探测技术的发展^[12-13]。而 LQA 技术则随着第二代短波自动链路建立系统(2G-ALE)的发展而得到广泛应用,随着信号处理技术以及 DSP 硬件的发展,LQA 的速度和精度都得到了较大的提升,为短波通信提供了有效保障。

3.1 国内方面

我国自 20 世纪 80 年代末开始关注短波信道探测技术,研制了一批短波选频系统和频率管理系统并投入使用,如 BF-3200、TCP-724、MSR-8000 等。目前,国内有关短波信道探测方面的研究多围绕电离层脉冲探测技术展开,并取得了一系列成果。但总

体来看,国内在短波信道探测方面所做的研究相对较少,且偏重于理论层面。

武汉大学电离层实验室于 2008 年 10 月研制成功多功能短波电离层探测系统,该系统基于软件无线电思想,可完成单站垂直入射探测、单站斜向返回探测,也可两套系统相互配合完成斜向入射探测,与传统电离层探测设备相比,功能更加多样,能够提供更加全面准确的电离层信息^[14]。武汉多功能电离层探测系统采用脉冲探测体制,采用脉间相位编码,克服了以往线性调频脉冲压缩体制对多普勒频移不敏感的缺点,利用 GPS 和高性能恒温晶振进行时间同步和频率同步,时间同步精度达 ns 量级,频率同步精度达到 10^{-12} 量级以上^[15]。相关研究人员利用该系统对国内多条短波链路进行探测分析,获得了大量有用资料。

海军工程大学的 Liu Yueliang 等人对电离层脉冲探测技术进行改进,提出了一种估计多普勒频移和传播时延的新算法^[16]。该算法基于扩频滑动相关法进行信道参数的测量:探测发起端发射一串伪随机序列,接收端将接收到的序列与原序列进行相关运算,即可得到信道的冲激响应。在具体实现上,发射端对伪随机序列进行 BPSK 调制,接收端经过解调后与本地序列进行相关运算,利用相关峰估计出多普勒频移和传播时延,能在较低的信噪比下 (-20 dB) 实现较准确的估计。

针对电离层探测中的射频干扰问题,中国科学院的 Chen Ziwen 等人提出了一种窄带干扰抑制算法^[17]。由于射频干扰在频域通常表现为较高的谱峰,因此该算法利用 FFT 变换在接收信号中定位噪声频谱,然后再利用 IFFT 还原出噪声波形并在时域波形中剔除。仿真和实验均证明该算法起到了良好的噪声抑制效果,有效提高了电离层探测精度。

3.2 国外方面

国外则更倾向基于 Chirp 探测的信道评估技术,主要研究对探测技术的改进以及实测结果的进一步分析。

美国 Barnes 等人对传统 Chirp 探测技术进行了改进,提出了宽带并行探测技术^[18]。其主要思想是将整个短波频段划分为若干子频带,每个子频带对应一个 FMCW 探测波,实现对整个短波频段的分段并行探测,大大提高了探测速度。从发射机发出的探测波是一组在不同频段 FMCW 信号的叠加,具有较宽的带宽,为了避免出现大幅度的瞬时脉冲,对各探测波形的初相进行调整。探测子频带的划分可根据需要进行灵活选择,并且可以跳过禁用频带,避免

对其他用户产生干扰。对该系统的实测结果表明,完成整个短波频段的探测只需数秒钟,显示出良好的性能。但该方案对探测发射机的性能提出了更高的要求,要求其具有宽频带发射能力,大大增加了结构复杂度。

相对于探测技术本身,更多的研究人员将目光转向对探测数据的分析,以期获得对电离层和短波的详细认识。英国 M. H. Tooby 等人对短波信道及其高速数传性能进行了实测研究,分析了信噪比以及多径时延的变化规律,指出 D 层的吸收作用对信噪比有较大影响,而 F 层则是影响多径时延的主要因素^[19]。挪威 V. Jodalen 等人使用 DAMSON (Doppler and Multipath Sounding Network) 探测系统对两条高纬度短波链路进行测量分析^[20];英国莱斯特大学 A. J. Stocker 等人对中纬度的一条远距短波链路 (3 340 km) 进行了探测^[21];此外,还有相关研究人员进行了赤道地区的短波信道研究^[22]以及超远距离的短波信道实测分析^[23]。俄罗斯 Rostov 大学的 Vertogradov 等人利用 Chirp 探测仪分别对 3 条不同长度的短波链路进行了探测,主要分析各传播模式的最高观测频率的日变化情况,在此基础上建立了电离层预报模型^[24]。大量短波信道实测分析所积累的相关数据,对于分析短波信道参数的变化规律以及建立相应模型具有很强的参考价值,有助于进一步完善短波频率预报机制;另一方面,短波频率预测技术又会为信道探测提供参考,两者相互促进,共同推动短波频率管理技术的发展。

1999 年,美军提出 MIL-STD-188-141B 标准,定义了第三代短波自适应链路建立系统 (3G-ALE),它以链路建立的同步性为最主要的特征,有效缩短了链路建立时间,提高了建链成功率^[25]。3G-ALE 基本上沿用了 2G-ALE 的 LQA 机制,但由于网内所有站点在各个信道上进行同步扫描,因此进行 LQA 所花费的时间大大降低。另一方面,3G-ALE 在进行频率规划和优选时主要依靠频率预测和电离层探测的结果以及日常通信情况的积累,加上完善的链路建立机制对信道要求不高,使 LQA 的作用远不如在 2G-ALE 上重要。当系统空闲时,可在每个驻留时间的最后一个时隙发送探测信号,仅对信道质量进行进一步的监控。

由于 3G-ALE 的影响等各方面原因,目前对 LQA 技术的研究较少,仅有相关人员从应用层面对其提出改进。澳大利亚 CODAN 公司的 A. M. Hess 针对 LQA 时效性不高的问题,提出了一种改进方案:Hess 认为短波信道的日变化较为剧烈,而在每天的同一时段,信道特性则较为相似,因此在一天内

每隔数小时进行一次 LQA, 将其结果作为日后数天的参考, 以最大程度地减少 LQA 次数^[26]。文献[27]提出利用信道编码技术, 将 LQA 嵌入到正常的业务通信中, 可减少额外的开销。

4 总结与展望

总结当前短波信道质量评估技术可以看到: 使用独立信道探测系统可在整个短波频段内快速实现频率优选, 探测结果可作为频率规划和分配的依据, 有助于在复杂电磁环境中实现可靠通信, 但是需要在现有短波通信系统上增加额外的设备, 增加了运行成本; LQA 技术嵌入到短波自适应通信系统中, 无需额外探测设备, 但探测速度慢, 花费时间长, 因此一般利用 LQA 对已规划好并分配至本站的预置信道进行评估和排序, 所选出的最佳信道在整个短波频段内并不一定是最优的。所以有必要将两类信道评估技术结合起来, 实现探测与通信相结合, 并且能在整个短波频段内进行快速信道估值的系统。可以在现有自适应电台上增加同步模块, 改进 LQA 算法, 实现快速同步探测; 同时可结合短波频率预报技术, 只在预报的可通频段内进行探测, 与全频段探测相比可有效减少探测时间, 提高探测效率。

另外, 在进行通信时, 不同种类的业务将采用各自独立的编码、交织、调制方式, 且对实时性、差错率等要求也不尽相同, 因此可结合具体业务, 为其分配相应质量等级和频率特性的信道, 以充分利用频率资源, 提高频率分配和管理的效率。这对短波信道质量评估技术提出了新的要求, 需要其改变以往“一刀切”的信道估值方式, 去分析不同业务对信道的要求, 结合具体的业务类型进行针对性的信道探测和频率优选。目前已有相关研究人员做了一些有益的尝试, 其研究重点主要集中于不同的波形在各种信道条件下的表现: 文献[28]研究了当采用不同编码方式和调制方式时, 信道参数(如信噪比、多普勒展宽等)的时变性对通信质量的影响; 文献[29]和[30]则分析了各种链路层协议在不同信道中的表现; 文献[31]将 MIL-STD-110A 标准以及 MIL-STD-110C 标准规定的波形在不同多径时延以及多普勒展宽下的误码率进行比较。

2011 年 9 月, 美军提出最新短波宽带数据通信标准 MIL-STD-188-110C, 规定了最高带宽为 24 kHz 的调制波形, 将短波宽带通信推向实用化^[32-33]。蓬勃发展的短波宽带通信为信道质量评估和选择提出了更高的要求, 如何在拥挤的短波频段快速寻找适合宽带传输的信道, 需要探测体制和算法方面进行

深入研究。

作为当前通信领域研究的热点, 认知无线电技术让用户能够实时感知周围环境的频谱使用状况, 主动寻找可用频谱资源, 实现动态频谱接入, 提高频率使用效率。2009 年, 美国 Harris 公司 E·Koski 等人提出将软件无线电思想应用于短波通信, 以缓解频谱资源供求矛盾^[34]; 2010 年, Adnan Shahid 等人提出了“认知 ALE”的概念, 将认知无线电与短波自适应通信系统结合起来, 指出应用认知无线电技术可有效提高建链成功率, 缩短建链时间^[35]。认知无线电在短波通信中的应用, 对信道质量评估的准确性和实时性要求将会更高, 并且需要其进行相应的功能扩展: 不仅能分析链路质量, 还要进行频谱监测^[36]。

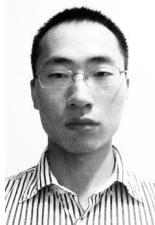
当前, 随着技术的进步和需求的扩展, 短波通信进入了一个快速发展阶段, 短波信道质量评估作为短波通信的重要支撑部分, 今后将向着智能化方向发展, 如何在提高全面性和精确性的同时缩短探测时间, 是目前需解决的主要问题。

参考文献:

- [1] 景渊, 周义健, 戚云军, 等. 一种基于软交换的短波接入网关设计[J]. 电讯技术, 2012, 52(9): 1522—1527.
JING Yuan, ZHOU Yi-jian, QI Yun-jun, et al. Design of a HF Access Gateway Based on Soft Switch[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(9): 1522—1527. (in Chinese)
- [2] William N F, Eric N K, John W W. Design and system implications of a family of wideband HF data waveforms[C] // Proceedings of NATO Research and Technology Organization IST—092 Symposium: Military Communications and Network. New York: Harris Corporation, 2011: 1—7.
- [3] Ritchie S E. WRC—07 and Future HF Spectrum Usage [C] // Proceedings of 10th International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques. London, UK: IET, 2006: 183—187.
- [4] Haykin S. Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201—220.
- [5] Rickard B. Introducing HF 2000 in the Swedish Armed Forces[R]. San Diego, USA: High Frequency Industry Association, 2010.
- [6] Arthur N P, Taylor I D, Eddie K D. Advanced HF Spectrum Management Techniques [C] // Proceedings of 10th International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques. London, UK: IET, 2006: 152—156.
- [7] 杨国斌, 赵正予, 陈绪元. 基于相位编码脉冲压缩体制的电离层探测系统[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(3): 33—35.
YANG Guo-bin, ZHAO Zheng-yu, CHEN Xu-yuan. Ionospheric sounding system based on phase modulate pulse compress [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2009, 37(3): 33—35. (in Chinese)
- [8] ITU 9C/TEMP/5—E21, Frequency Management of Adaptive HF Radio Systems and Networks Using FM/CW Oblique Incidence Sounding[S].
- [9] MIL-STD-188-141A, Interoperability and Performance Stan-

- standard for Medium and High Frequency Radio Systems[S].
- [10] Kam P Y. Bit-Error Probabilities of 2 and 4DPSK with Non-selective Rayleigh Fading, and Correlation Gaussian Interference[J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(4): 400—403.
 - [11] Desourdis R I, Johnson E E. Advanced Link Quality Analysis for ALE HF Radio[C]//Proceedings of 1993 IEEE Military Communication Conference. Boston, MA; IEEE, 1993: 91—95.
 - [12] Earl G F, Ward B D. The Frequency Management System of the Jindalee Over-the-Horizon Backscatter HF Radar[J]. Radio Science, 1987, 22(2): 275—291.
 - [13] Frazer G J. Forward-Based Receiver Augmentation for OTHR[C]//Proceedings of 2007 IEEE Radar Conference. Boston, USA; IEEE, 2007: 373—378.
 - [14] 陈罡, 赵正予, 聂学东, 等. 武汉多功能电离层探测系统[J]. 武汉大学学报, 2011, 57(2): 170—174.
CHEN Gang, ZHAO Zhengyu, NIE Xue-dong, et al. The Wuhan Multifunction Ionospheric Sounding System[J]. Journal of Wuhan University, 2011, 57(2): 170—174. (in Chinese)
 - [15] Yao Ming, Chen Gang, Zhao Zhenyu, et al. A Novel Low-Power Multifunctional Ionospheric Sounding System[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(5): 1252—1259.
 - [16] Liu Yueliang, Jiang Yuzhong, Jiang Wei, et al. Estimation Algorithm of Doppler Shift and Time Delay in HF Channel Sounding[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Chengdu: The Chinese Institute of Electronics, 2011: 351—354.
 - [17] Chen Ziwei, Wang Shun, Wang Wei, et al. The Radio Frequency Interference Mitigation in Ionospheric Sounding[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control. Beijing: IEEE, 2011: 712—715.
 - [18] Barnes R I, Fred E G, Papazoglou M, et al. The Instagram: A Novel Sounding Technique for Enhanced HF Propagation Advece[R]. Ohio, USA: Air Force Institute of Technology, 2010.
 - [19] Tooby M H, Arthur P C, Cotterill P L, et al. An Assessment of The Propagation Characteristics of The HF NVIS Channel[C]//Proceedings of 8th International Conference on HF Radio Systems and Techniques. Guildford, UK; IEE, 2000: 263—267.
 - [20] Jodalen V, Lundborg B, Jacobsen B. Channel Characteristics of HF NVIS Paths in Northern Scandinavia[C]//Proceedings of 8th International Conference on HF Radio Systems and Techniques. Guildford, UK; IEE, 2000: 269—273.
 - [21] Stocker A J, Muriuki M, Warrington E M. Comparison of Oblique Sounding Measurements and VOACAP Predications on a Mid-latitude Path[C]//Proceedings of 11th International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques. Edinburgh, UK; IET, 2009: 65—68.
 - [22] Barclay L W, Caruana J. A model for time and frequency spreading of radio signals propagating through the equatorial ionosphere[C]//Proceedings of 10th International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques. London, UK; IET, 2006: 120—122.
 - [23] Vilella C, Socoro J C, Pijoan J L, et al. An Antarctica to Spain HF Link: Oblique Sounding Results[C]//Proceedings of 10th International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques. London, UK; IET, 2006: 91—94.
 - [24] Vertogradov G G, Uryadov V P, Vertogradov V G. Oblique Sounding and Modeling of the Ionospheric HF Channel[J]. Radiophysics and Quantum Electronics, 2005, 48(6): 405—419.
 - [25] MIL-STD-188-141B, Interoperability and Performance Standard for Medium and High Frequency Radio Systems[S].
 - [26] Hess A M. Advanced Use of LQA Data in Improving The Quality and The Speed of ALE Link Establishment While Reducing Sounding Requirements in HF Networks[C]//Proceedings of 8th International Conference on HF Radio Systems and Techniques. Guildford, UK; IEE, 2000: 91—94.
 - [27] Side A, Sha'ameri A Z. Robust Adaptive Coding Schemes for Multipath Fading Channels[C]//Proceedings of 2008 International Symposium on Information Theory and its Applications. Auckland, New Zealand; IEE, 2008: 1—6.
 - [28] Fuman W N, Nieto J W. The Effects of Channel Variability on High Data Rate HF Communications[C]//Proceedings of 10th International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques. London, UK; IET, 2006: 115—119.
 - [29] Batts W, Fuman W N, Koski E. Channel Quality Variation as a Design Consideration for Wireless Data Link Protocols[C]//Proceedings of 2007 Military Communications Conference. Orlando, USA; IEEE, 2007: 1—10.
 - [30] Arcoraci D. Channel quality variation and its impact on data link protocol performance[R]. San Diego, USA: High Frequency Industry Association, 2007.
 - [31] Nieto J W, Fuman W N. Waveform Comparison based on Multipath and Doppler Spread Capability[R]. San Diego, USA: High Frequency Industry Association, 2012.
 - [32] MIL-STD-188-110C, Interoperability and Performance Standard for Data Modems[S].
 - [33] 屠文超, 江天娇, 叶向阳, 等. 美军短波宽带数据通信标准的最新进展[J]. 电讯技术, 2012, 52(9): 1547—1551.
TU Wen-chao, JIANG Tian-jiao, YE Xiang-yang, et al. Latest Development of US Wideband Standard for Data Communications over HF Radio[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(9): 1547—1551. (in Chinese)
 - [34] Koski E, Fuman W N. Applying Cognitive Radio Concepts to HF Communication[C]//Proceedings of 11th International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques. Edinburgh, UK; IET, 2009: 1—6.
 - [35] Shahid A, Ahmad S, Akram A, et al. Cognitive ALE for HF Radios[C]//Proceedings of Second International Conference on Computer Engineering and Applications. Bali Island, Indonesia; IEEE, 2010: 28—33.
 - [36] Giesbrecht J E, Clarke R, Abbott D. Improved techniques for monitoring the HF spectrum[C]//Proceedings of Microelectronics Design, Technology and Pathaging. Perth, Australia; SPIE, 2003: 112—122.

作者简介:



杨凯陟(1990—),男,陕西富平人,2011年获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为短波通信;

YANG Kai-zhi was born in Fuping, Shaanxi Province, in 1990. He received the B.S. degree in 2011. He is now a graduate student. His research direction is HF communication.

Email: 18191918806@163.com

叶向阳(1970—),男,湖北黄冈人,2008年获硕士学位,现为高级实验师,主要研究方向为短波通信。

YE Xiang-yang was born in Huanggang, Hubei Province, in 1970. He received the M.S. degree in 2008. He is now a senior experimentalist. His research direction is HF communication.