

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.06.029

非正弦波通信的发展与关键技术^{*}

赵志勇^{**}, 刘锡国, 毛忠阳, 王红星

(海军航空工程学院 电子信息工程系, 山东 烟台 264001)

摘 要:为了正确把握非正弦波通信的发展方向,从脉冲无线电技术和正交函数两个角度分析了非正弦波通信的发展历程,并对研究现状、待解决难点问题进行深入剖析;从信号设计、谐振理论、辐射理论和信号产生 4 个方面分析了非正弦波通信的关键技术,以此探索发展高能效、高频谱利用率的非正弦波通信体制的有效途径。

关键词:无线通信;非正弦波通信;椭圆球面波函数

中图分类号:TN911.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)06-0818-05

Development and Key Technology of Nonsinusoidal Wave Communication

ZHAO Zhi-yong, LIU Xi-guo, MAO Zhong-yang, WANG Hong-xing

(Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: To understand the development of nonsinusoidal wave communication correctly, this paper analyzes the development of nonsinusoidal communication from two aspects of pulse radio technology and orthogonal function and offers great insight into the research status and difficult problem. The key technologies are discussed from the aspect of signal design, resonance theory, radiation theory and signal generation, so as to explore an effective way to develop high energy efficiency and bandwidth efficiency nonsinusoidal communication system.

Key words: wireless communication; nonsinusoidal wave communication; prolate spheroidal wave function

1 引 言

宽带无线通信业务需求的快速增长与无线频谱资源的日趋紧张之间的矛盾是通信领域所面临和亟需解决的主要问题,探索研究新型高能效、高频谱利用率的无线通信技术是解决该问题的一种有效手段。

自从 20 世纪初马可尼发明 LC 谐振电路以来,采用正弦函数信号承载信息几乎是近百年来通信系统设计的固有模式,甚至已经成为人们的习惯。但从信号谐振选频的角度来看,这种通信系统设计方法仅易于实现小相对带宽通信,不易于实现宽带大容量通信。然而,信息传输还存在更广阔的研究领域,除正弦函数外,非正弦函数也可用于传输信息。

非正弦函数作为比正弦函数更一般的信号形式,在时频域能量聚集性及辐射传输方面有着潜在的优势,有望获得高能效、高频谱利用率的系统性能。早在 20 世纪 60 年代, Harmuth 就提出了基于沃尔什函数传输信息的非正弦波通信理论^[1]。现在热门的超宽带通信技术也可看作是非正弦波通信的一个实例,目前已在近距离高速数据通信领域初显优势。但是,从非正弦波通信理论的应用现状来看,非正弦波通信理论并没有得到广泛应用,目前仅能应用于特殊通信频段,例如基带通信频段、超宽带通信频段及其他特殊应用领域。

为了深入分析限制非正弦波通信推广应用的技术瓶颈,正确把握非正弦波通信的发展方向,本文针对现有非正弦波通信理论的发展历程、研究现状进

^{*} 收稿日期:2012-11-28;修回日期:2013-04-09 Received date:2012-11-28;Revised date:2013-04-09
^{**} 通讯作者:mailzy@126.com Corresponding author:mailzy@126.com

行深入剖析,以此探索发展高效非正弦波调制技术的有效途径,促进非正弦波通信理论的推广应用。

2 非正弦波通信理论的发展历程与研究现状分析

纵观非正弦波通信理论的起源及发展历程,可将非正弦波通信领域划分为两个主要研究方向,一是基于脉冲无线电技术的非正弦波通信,另一个是基于正交函数的非正弦波通信。

2.1 基于脉冲无线电技术的非正弦波通信

脉冲无线电技术源于 20 世纪 60 年代时域电磁学中对某类雷达微波网络瞬态行为的研究^[2]。但是,直到 1962 年,HP 公司发明了采样示波器,同时次纳秒脉冲产生技术取得了重大突破,此类微波网络的瞬态响应才得以直接观测。1968 年,Ross 将时域脉冲测量方法应用到宽带辐射天线组件设计中,并意识到通信系统也可以使用相同的手段来研制。Ross 在《时域电磁学及其应用》^[3]中,讨论了时域电磁学方法在基带脉冲雷达领域中的应用,并展望了该方法在通信领域中所潜在的巨大应用价值。随后,学术界开始致力于时域脉冲信号在通信领域中的应用研究。

1972 年,Robbins 申请了一项关于灵敏短脉冲接收机的发明专利“基带窄脉冲接收机”^[4],基于雪崩二极管和隧道二极管,实现了次纳秒级脉冲的检测,该项发明进一步促进了时域脉冲信号在无线电通信系统中的应用研究。1973 年,Ross 的发明专利公开了一种脉冲编码调制方法:脉冲间隔调制或脉冲位置调制。同年,他又公开了另一项关于“基带窄脉冲通信系统中用于无失真产生和接收基带脉冲信号的收发机”的发明专利^[5],阐述了脉冲无线电通信系统的工作机制。该项专利被学术界认为是基于脉冲无线电技术的非正弦波通信的里程碑。

20 世纪 80 年代,基于脉冲无线电技术的非正弦波通信又被学术界称为基带通信、无载波通信或脉冲无线电技术。该技术的信息调制方法通常采用脉冲位置调制(Pulse-Position Modulation, PPM)、脉冲幅度调制(Pulse-Amplitude Modulation, PAM)、脉冲宽度调制(Pulse-Width Modulation, PWM)等。由于调制信号的带宽极宽,其功率比较均匀的分布在很宽的频率范围内,所以其功率谱密度很低,类似于随机噪声。因此,用于信息传输时,难以侦察检测,大大降低了截获概率,从而提高了系统的保密性能,在军事

保密通信中非常具有优势。但是,从单位频带利用率的角度来看,由于脉冲信号带宽通常远大于信息传输速率,这种方法的单位频带利用率是极低的。

基于脉冲无线电技术的非正弦波通信,是以小占空比的基带窄脉冲传输信息,传输信号的频率范围常常从几 Hz 一直延续到 MHz 甚至 GHz。因此,调制信号通常具有大相对带宽特性,该特性使该方法在大容量宽带通信方面非常具有优势。

但是,采用大相对带宽通信是与现有的无线电频谱管理规定相矛盾的。在现有无线电频谱管理体制中,通常是以小相对带宽特性实现波道划分。这意味着,在现有无线电频谱管理体制下,在同一频段内,基于脉冲无线电技术的非正弦波通信方法与正弦波通信兼容是非常困难的,采用该技术传输信息时,势必会对现有正弦波窄带用户产生电磁干扰。

针对脉冲无线电系统对现有窄带无线电通信系统的干扰及其相互共存的问题,2002 年美国联邦通信委员会(FCC)开放了脉冲无线电技术在短距离无线通信领域的应用许可,将脉冲无线电技术的通信频段限定为 3.1 ~ 10.6 GHz,同时给出严格的功率谱掩模要求,规定室内通信等效全向辐射功率谱密度最高不能超过 -41.3 dBm/MHz^[6-7]。在频谱掩模框架下,由于脉冲无线电信号的功率比较均匀地分布在很宽的频率范围内,功率谱密度很低,类似于随机噪声。因此,对于正弦波窄带用户来说,这种干扰是可以容忍的,从而使脉冲无线电技术以频谱共享的方式实现了与现有窄带用户的频谱共存,如图 1 所示。

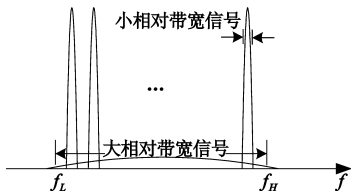


图 1 脉冲无线电技术与窄带用户频谱共享示意图
Fig.1 Spectrum share between impulse radio and narrow band user

应用于 3.1 ~ 10.6 GHz 通信频段的脉冲无线电技术又被学术界称为超宽带通信技术(Ultra Wideband Communication, UWB)。此时,基于脉冲无线电技术的非正弦波通信的原理、技术和许多的硬件设备已经经历了 30 多年的发展。因此,超宽带通信技术可以看作是非正弦波通信的一个实例。

通过上述分析可知,基于脉冲无线电技术的非正弦波通信方法,其固有的大相对带宽特性使该方

法在宽带大容量通信方面非常具有优势,但也正是其固有的大相对带宽特性,使其与正弦波通信在现有的无线电频谱管理体制下兼容十分困难,直至2002年FCC出台相应的频谱管理办法之后,才使该项技术以频谱共享的方式在超宽带通信频段(3.1~10.6 GHz)真正得到应用。然而,除此频段外,FCC并未授权该技术在其他频段的应用。

2.2 基于正交函数的非正弦波通信

从傅氏变换理论角度来看,对于大多数用于通信系统的传输波形,都可以且仅能表示为正弦和余弦函数的叠加,这一点常被许多人看成是必然的事。事实上,用正弦和余弦函数表示时间函数,只是许多函数表示法中的一种。任何一个完备的正交函数系,一般都能用来进行与傅氏变换相当的变换。因此,可以认为:话筒的输出电压或是沃尔什函数,或是勒让德多项式,或是抛物圆柱函数等的叠加。

20世纪60年代,学术界逐渐认识到用于信息传输的信号,不一定必须具有正弦函数的时间变化规律,非正弦函数也可以用于信息传输。1969年,Hamuth发表了题为《沃尔什函数在通信中的应用》^[1]一文,提出了基于正交沃尔什函数的非正弦波通信方法。序率是沃尔什函数的一个重要参数,所以该系统又被称为序率分割多路传输系统。20世纪80年代,北京航空航天大学的张其善教授,基于正交函数的非正弦波通信理论,发明了序率分割制遥测系统^[8]。

Hamuth在文献[8-9]中指出了传统的正弦载波通信体制的小相对带宽特性所带来的问题,并提出具有大相对带宽特性的非正弦波调制方法可有效增加信息传输带宽,从而提高信息传输容量,同时提出了基于正余弦脉冲的非正弦波基带调制方法,并用于有线传输系统。在该方法中,采用多路正余弦脉冲叠加形成大相对带宽信号,以增加信息传输的相对带宽,从而提高通信系统的总传输速率。同时,由于传输信息的正余弦脉冲的频谱相互混叠,大幅减小了信息传输带宽,因此,该方法在单位频带利用率方面也非常具有优势。但是,由于没有实现调制信号频谱搬移的方法,以及有效控制频谱带宽的方法,使得调制后的信号不能满足现有的无线电频谱管理要求,在相同的频段内与正弦波通信兼容十分困难,从而限制了该方法的实用性推广。如何基于非正弦函数设计具有小相对带宽特性的正交脉冲信号传输信息,是实现该方法与正弦波通信在现有频谱管理体制下相兼容的关键。但是,Hamuth并未针

对该问题进行探讨,也未见其他文献进行相关论述。

非正弦波通信信号的大相对带宽特性,使得非正弦波通信在宽带大容量通信方面具有独特的优势,但是,正是大相对带宽特性,使得非正弦波通信在现有无线电频谱管理体制下,在相同的频段内与正弦波通信兼容十分困难。非正弦波通信与正弦波通信在现有频谱管理体制下的兼容问题已成为非正弦波通信应用的技术瓶颈。

为了解决非正弦波通信与正弦波通信在现有频谱管理体制下的兼容问题,同时为了实现信息的高频谱利用率、高效传输,文献[10-11]提出了一种新的非正弦波通信方法——非正弦时域正交调制方法。该方法从非正弦函数信号的频谱控制方法入手,根据通信频段频域特性参数反向设计时域脉冲波形,基于非正弦函数设计频谱特性可控的脉冲信号传输信息,旨在使非正弦波调制信号成为相对带宽可控、中心频率可调的带限信号,既可形成大相对带宽信号实现宽带通信,以保持现有非正弦波通信方法的优势,又可形成小相对带宽信号实现窄带通信,与正弦波通信在现有频谱管理体制下相兼容。

3 基于正交函数的非正弦波通信关键技术分析

(1)非正弦波信号的选取与波形设计

最佳非正弦通信信号的选取是实现高效的非正弦波通信体制的基础。从非正弦波通信概念提出至今,研究学者曾将 Hermit 函数、沃尔什函数、小波^[12]、高斯函数、PSWF^[13]等应用到通信系统中。非正弦函数的性能直接关系到通信系统的有效性和可靠性。从高效要求的角度来看,椭圆球面波函数(PSWF)能够在时-频平面内将最多的信号能量压缩至最小的范围,且0阶带通椭圆球面波函数脉冲信号与同样时宽的任意脉冲信号相比在指定的带宽范围内具有最高能量聚集性。近年来,研究学者基于PSWF展开了脉冲波形设计方法研究,并提出了正交脉冲设计方法,有效改善了通信系统的能效。文献[13]基于PSWF设计了频谱交叠、时域正交的正交脉冲设计方法,用于传输信息时,可大幅降低频谱资源,提高了通信系统的频带利用率。

(2)非正弦波信号的谐振理论

从信号谐振现象的数学基础可以看到,具有线性时不变元件组成的集中参数电路总是用线性常系数微分方程来描述,而正弦函数是谐振时线性常系

数微分方程的特解,因而线性时不变元件组成的集中参数电路也只与正弦函数谐振。然而,谐振的数学概念意义更为广泛,特别是,它还适用于变系数线性常微分方程和偏微分方程,也就是说,对于变系数线性微分方程所描述的线性时变元件组成的集中参数电路和偏微分方程所描述的分布参数电路也存在谐振现象,且与它们谐振的函数不再是正弦函数。这就使得谐振现象并不为正弦函数所独有,非正弦函数也存在谐振现象,也可用于传输信息。Harmuth 在专著《非正弦波通信及雷达》^[14]中基于非正弦函数的常(变)系数线性常微分方程定义分别设计了正余弦脉冲信号、勒让德函数信号、贝塞尔函数信号的谐振检测电路,以有源谐振滤波器的形式验证了非正弦波可以谐振观点的正确性。非正弦波信号的谐振问题是非正弦波通信体制实现信号选择、放大等方面的关键共性问题,也成为丰富和完善非正弦波通信理论的重要研究方向之一。

(3) 非正弦波信号的辐射理论

从天线辐射的基础理论来看,正弦波信号只是麦克斯韦方程的特解,而非正弦波是其通解;非正弦波所代表的通解更具普遍性,预示着非正弦波信号在信号辐射性能方面可能会更具优势。天线辐射效率又将直接影响通信系统能效,因此,非常有必要对非正弦波信号的辐射特性加以分析,并设计相应的高效天线辐射模型。该问题的研究不仅关系到非正弦波信号传输性能优势的发挥,更是非正弦波通信理论研究的重要方向之一。

(4) 非正弦波信号的产生

大多非正弦函数都没有一个由基本函数构成的解析表达式,只存在由微分方程或积分方程给出的隐式定义,因此,相应求解和脉冲信号的产生也是实现非正弦波通信的关键课题。对于椭圆球面波函数(PSWF)来说,由于求解方法的复杂性和工艺上实现极为困难,半个世纪以来对其应用的研究没有多大进展。现代计算机技术及数字信号处理技术的发展,使得非正弦函数的数值求解和数字直接合成产生方法成为可能,很多像椭圆球面波函数(PSWF)一样的非正弦函数信号才逐步走向实用,但这种数值产生方法极大依赖于硬件水平的发展。因此,必须寻找快速高效且简单易行的非正弦脉冲信号求解与产生方法,这是非正弦通信体制走向应用的关键问题之一。文献[15-16]分别从 PSWF 的微分方程定义式和勒让德多项式逼近的方法,提出了 PSWF 的信号产生方法。

综上所述,非正弦波信号的谐振理论及辐射理论是丰富和完善非正弦波通信体制的重要研究课题,非正弦波信号的选取、波形设计及其产生方法是实现非正弦波通信的关键。

4 结束语

难以与现有的无线电频谱管理体制相兼容和通信效率低是现有非正弦波通信理论存在的两个主要待解决难点问题。寻求探索频谱灵活可控的与现有无线电管理体制相兼容的高能效、高频谱利用率的非正弦波通信体制是未来非正弦波通信理论研究的重点方向之一。相对于传统正弦波通信体制来说,非正弦波通信体制有望进一步提高通信系统的能效。

参考文献:

- [1] Harmuth H F. Applications of walsh functions in communications[J]. IEEE Spectrum, 1969, 6(11): 82-91.
- [2] Barrett T W. History of ultra wideband (UWB) radar&communications: pioneers and innovators[C]//Proceedings of 2000 Progress in Electromagnetics Symposium. Cambridge: IEEE, 2000: 1-29.
- [3] Bennett C L, Ross G F. Time-domain electromagnetics and its applications[J]. Proceedings of the IEEE, 1978; 66(3): 299-317.
- [4] Robbins K W. Short base-band pulse receiver: US, 3662316[P]. 1972.
- [5] Ross G F. Transmission and reception system for generating and receiving base-band duration pulse signals without distortion for short base-band pulse communication system: US, 3728632[P]. 1973.
- [6] Win M Z, Scholtz R A. Impulse radio: how it works[J]. IEEE Communications Letters, 1998, 2(1): 10-12.
- [7] Maria-Gabriella D B, Branimir R V. Ultra wide band wireless communications: a tutorial[J]. Journal of Communications and Networks, 2003, 5(4): 290-302.
- [8] Harmuth H F. Fundamental limits for radio signals with large bandwidth[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1981, EMC-23(1): 37-43.
- [9] Harmuth H F. Frequency-sharing and spread-spectrum transmission with large relative bandwidth[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1978, EMC-20(1): 232-239.
- [10] 王红星, 赵志勇, 刘锡国, 等. 非正弦时域正交调制方法: 中国, ZL200810159238.3[P]. 2011.
WANG Hong-xing, ZHAO Zhi-yong, LIU Xi-guo, et al. The method of nonsinusoidal orthogonal modulation in time domain: China, ZL200810159238.3[P]. 2011. (in Chinese)
- [11] 赵志勇, 王红星, 刘锡国, 等. 正交椭圆球面波函数脉冲调制方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(10): 2331-2335.
ZHAO Zhi-yong, WANG Hong-xing, LIU Xi-guo, et al. Orthogonal PSWF Pulse Modulation Method[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(10): 2331-2335. (in Chinese)

- [12] 张洪欣,吕英华,贺鹏飞,等.利用小波函数生成 UWB 正交成形脉冲序列的方法[J].北京邮电大学学报,2006,29(4):61-64.
ZHANG Hong-xin, LV Ying-hua, HE Peng-fei, et al. A method to generate orthogonal shaping pulses for UWB using wavelet[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications,2006,29(4):61-64. (in Chinese)
- [13] 赵志勇,王红星,舒根春,等.基于 PSWF 的高效正交脉冲设计方法[J].系统工程与电子技术,2011,33(9):2106-2109.
ZHAO Zhi-yong, WANG Hong-xing, SHU Gen-chun, et al. A orthogonal pulses designing method based on PSWF[J]. Systems Engineering and Electronics,2011,33(9):2106-2109. (in Chinese)
- [14] Harmuth H F. Nonsinusoidal waves for radar and radio communication[M]. New York: Academic Press,1981.
- [15] 钟佩琳,王红星,赵志勇,等.基于状态转移矩阵逼近的椭圆球面波函数求解方法[J].电子与信息学报,2012,34(10):2424-2431.
ZHONG Pei-lin, WANG Hong-xing, ZHAO Zhi-yong, et al. Algorithm for Prolate Spheroidal Wave Functions based on state transition matrix approximation [J]. Journal of Electronics&Information Technology,2012,34(10):2424-2431. (in Chinese)
- [16] 王红星,陈昭男,赵志勇,等.基于勒让德多项式的椭圆球面波脉冲设计方法[J].电波科学学报,2012,27(1):191-196.
WANG Hong-xing, CHEN Zhao-nan, ZHAO Zhi-yong, et al. The Design of PSWF Pulse Shape Based on Legendre Polynomials[J]. Chinese Journal of Radio Science,2012,27(1):191-196. (in Chinese)

作者简介:



赵志勇(1976—),男,山东济南人,2010 年获工学博士学位,主要研究方向是现代通信新技术、非正弦波通信;

ZHAO Zhi-yong was born in Jinan, Shandong Province, in 1976. He received the Ph.D. degree in 2010. His research concerns the new technology of modern communication and nonsinusoidal wave communication.

Email: mailzzy@126.com

刘锡国(1981—),男,山东烟台人,2011 年获工学博士学位,主要研究方向是现代通信新技术、非正弦波通信等;

LIU Xi-guo was born in Yantai, Shandong Province, in 1981. He received the Ph.D. degree in 2011. His research interests include modern communication technology and non-sinusoidal communications.

Email: lxx1023@163.com

毛忠阳(1979—),男,河南新乡人,2011 年获工学博士学位,主要研究方向现代通信新技术、通信信号处理;

MAO Zhong-yang was born in Xinxiang, Henan Province, in 1979. He received the Ph.D. degree in 2011. His research concerns the new technology of modern communication and signal processing in communication.

Email: freedom_mzy@yahoo.cn

王红星(1962—),男,河南商丘人,2008 年获工学博士学位,主要研究方向为现代通信新技术、航空通信导航。

WANG Hong-xing was born in Shangqiu, Henan Province, in 1962. He received the Ph.D. degree in 2008. His research concerns the new technology of modern communication and space communication navigation.

Email: buaa_whx@163.com