

# W 频段卫星通信中的恒包络 OFDM 技术

赵 乐, 宋爱民, 刘 剑, 马彦博

(空军工程大学 信息与导航学院, 西安 710077)

**摘要:** 随着传统的 C 频段, Ku 频段, Ka 频段的逐渐饱和, 人们开始研究特高频段 (EHF) 的卫星通信频段, W 频段 (75~110 GHz) 卫星通信凭借更高的传输速率和天线增益等优势受到了人们的关注; 总结了 W 频段卫星通信的优缺点, 结合卫星通信频谱效率问题介绍了在卫星信道中采用正交频分复用 (OFDM) 传输方式, 针对 OFDM 高峰均比的问题研究了恒包络 OFDM, 对恒包络 OFDM 的性能进行了分析; 分析表明恒包络 OFDM 解决了 OFDM 带来的高峰均比问题, 但性能受调制方式严重影响, 最后结合其发展现状展望了恒包络 OFDM 发展的趋势。

**关键词:** 卫星通信; 特高频段; 正交频分复用; 恒包络

## Constant Envelope OFDM Technology of W Band for Satellite Communication

Zhao Le, Liu Jian, Song Aimin, Ma Yanbo

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

**Abstract:** With the saturation of C, Ku and Ka frequency channel, people begin to study the higher frequency channel for satellite communication, and W band for satellite communication has been paid more attention because of its high transmission rate and antenna gain etc. The advantages and disadvantages of W band satellite communication are summarized, and the OFDM transmission technology in the satellite channel based on the efficiency problem is introduced. According to the high peak-to-average ratio of OFDM, constant envelope OFDM is studied and its performance is analyzed. The analysis result is that constant envelope OFDM solve the problem of high peak-to-average, however, it is effected by the modulation ways. Finally, its development trend is put forward combined with the development situation.

**Keywords:** satellite communication; EHF band; OFDM; constant envelope

## 0 引言

随着通信事业的飞速发展, 人们提出了在下一代数字通信中实现全球“千兆连接”的宏伟目标<sup>[1-2]</sup>, 卫星通信因其覆盖范围广、通信距离远、通信容量大等天然优势, 必然将在实现这一目标中发挥重要的作用。随着 Ku、Ka 频段的逐渐饱和, 卫星通信开始向更高的 W 频段发展。OFDM 作为第 4 代移动通信的关键技术, 由于拥有着更快的传输速率和更高的频带利用率, 同时能够很好地与地面兼容, 人们开始关注能否在卫星信道中采用 OFDM 传输技术。然而 OFDM 技术具有较高的峰均比, 将会带来包络失真、相位偏移及谱再生等很多问题<sup>[3]</sup>。恒包络 OFDM 的提出很好地解决了 OFDM 高峰均比的问题, 本文针对恒包络 OFDM 的性能进行了分析, 并对下一步研究工作进行了总结。

## 1 W 频段卫星通信

W 频段是指 75~110 GHz, 其中 71~76 GHz 和 81~

86 GHz 分别作为 W 频段卫星通信的上行、下行频段, 与传统的卫星频段相比, 它具有以下几点优势<sup>[4]</sup>:

- 1) 拥有更高的信息传输速率, 能够满足现在高速率的多媒体业务需求;
- 2) 由于天线增益随着频率的升高而升高, 所以在 W 频段发射信号时具有更低的发射功率, 同时具有更高的方向性;
- 3) 对于相同尺寸的天线, 频率越高, 波束宽度越窄, 因此在抗截获和抗干扰方面具有更好的性能;
- 4) 由于天线口径和频率成倒数关系, 所以在 W 频段通信时可以设计有更小的天线和设备尺寸;
- 5) 卫星和运载火箭的尺寸可以做到更小, 减少了设计成本和发射卫星时的费用。

然而, W 频段卫星通信在实现上具有很多问题: 1) W 频段天线要求具有更小的对星误差, 如果载波频率为 50 GHz, 那么对于口径为 1 m 的天线, 想要得到较小的对星误差损耗, 对星误差应控制在  $0.1^\circ$  以下, 同时需要 2 dB 的功率补偿; 2) W 频段放大器要求工作在饱和点附近, 这会带来严重的非线性失真; 3) W 频段微波振荡器将带来更高的相位噪声; 4) W 卫星通信会带来更加严重的大气损耗。

## 2 OFDM 技术

正交频分复用 (OFDM) 是一种新型的多载波传输技术, 在无线通信中得到了广泛的应用, 它的基本原理如图 1 所示<sup>[5-6]</sup>。

收稿日期: 2014-04-11; 修回日期: 2014-04-24。

基金项目: 航空科学基金(20120196002)。

作者简介: 赵 乐(1989-), 男, 陕西省渭南市人, 硕士研究生, 主要从事移动与卫星通信方向的研究。

宋爱民(1964-), 男, 陕西省西安市人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事移动与卫星通信方向的研究。

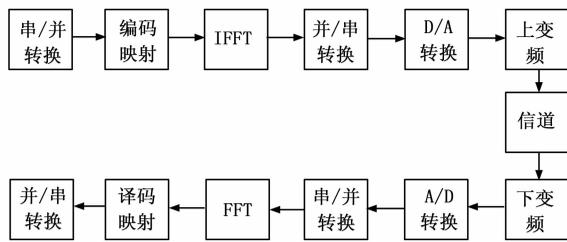


图 1 OFDM 系统原理图

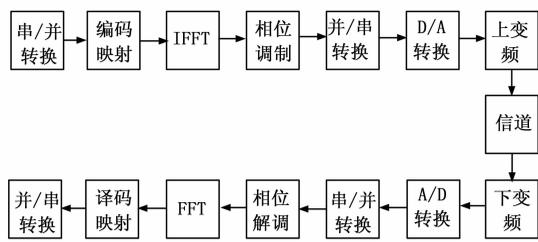


图 2 恒包络 OFDM 原理图

从图 1 中可以看出, 发送端的 0、1 序列经过串/并转换, 随后经过编码映射生成数据符号, 输入到 IFFT 模块, 经过并串转换, 得到离散的时域信号, 再通过 D/A 转换和上变频, 最终得到 OFDM 信号, 在接收端经过相反的转变则可恢复数据信息。与其他多载波传输技术不同, 在 OFDM 中各子信道之间在时域上相互正交, 当子信道数  $N$  较大时, OFDM 的频谱效率几乎是单载波系统的两倍, 这一点在频谱资源有限的无线环境中很重要, 同时可根据信道条件进行自适应的比特和功率分配, 充分利用信道容量, OFDM 的另外一大优势是能够集中发送功率, 由于功率的分配是按照子信道进行的, 上行用户可以将发射功率集中在某些子信道上, 同时利用 OFDM 技术可以很轻松地提高增益, 这样可以扩大覆盖范围、易于接入、使功率放大器变得简单和便宜<sup>[7]</sup>。

由于 W 频段卫星通信具有很多优势, 人们开始考虑将 OFDM 技术运用 W 频段卫星通信中, 但卫星通信的链路衰减是十分严重的, 因此 HPA (高功率放大器) 是应该尽量工作在饱和点附近, 这将带来很严重的非线性问题, 包括 AM/AM 失真和 AM/PM 失真。然而, OFDM 的调制波形具有很高的峰均比 (PAPR), 使 OFDM 信号对非线性失真非常敏感<sup>[8]</sup>。通过加大功率补偿可以减轻非线性问题的影响, 但是对于 60GHz 以上的频段, 由于设备水平的限制, 无法提供足够大的功率补偿<sup>[9]</sup>, 所以要在 W 频段采用 OFDM 传输技术, 首先必须解决 OFDM 的峰均比问题。

### 3 W 频段卫星通信中的 CE-OFDM 技术

通过上述分析得知, OFDM 信号具有很高的峰均比, 给 W 频段卫星通信会带来很大的难题。针对如何降低由 OFDM 带来的峰均比, 已经有了很多成熟的技术, 主要分为以下 4 类: 1) 通过削波的思想来降低峰均比, 包括直接削波法, 压缩削波法, 预测削波法<sup>[10-12]</sup>; 2) 通过部分传输序列法和选择映射法来降低峰均比<sup>[13]</sup>; 3) 通过编码的思想来降低峰均比, 最常用的是线性分组码法<sup>[14]</sup>; 4) 通过升余弦脉冲抵消法来降低峰均比<sup>[15]</sup>。但这些技术都存在着一一定的缺陷, 如增加了系统的复杂度、带来了严重的误码、降低了频谱效率。恒包络 OFDM (CE-OFDM) 的提出, 彻底解决了峰均比的问题, 其基本原理如图 2 所示<sup>[16]</sup>。

通过图 2 可以发现, CE-OFDM 是通过对载波信号相位进行 OFDM 信号调制生成的, 它可以看作对 OFDM 信号进行二次变换 (相位调制和相位解调), 可表示为<sup>[17]</sup>:

$$s(t) = Ae^{j\varphi(t)}$$

式中,  $A$  表示信号的放大增益, 相位  $\varphi(t)$  为 OFDM 实信号,

$\varphi(t) = 2\pi h m(t) + \theta$ , 其中  $2\pi h$  为调制系数,  $\theta$  为常数, 取决于所选取的相位调制方式,  $m(t)$  是实值信号, 定义为:

$$m(t) = C \sum_{k=1}^{N_{QAM}} \text{Re}[X(k)] \cos\left(\frac{2\pi k t}{T}\right) - \text{Im}[X(k)] \sin\left(\frac{2\pi k t}{T}\right)$$

表 1 给出了 OFDM 和 CE-OFDM 的 PAPR 比较结果<sup>[18]</sup>, 符号长度  $N=64$ , 循环前缀长度  $N_g=16$ , 参数  $A_{\max}$  表示数据符号最大幅值,  $\sigma_s^2$  表示每个符号的平均能量。可以看出, CE-OFDM 的 PAPR 均为 0 dB, 因此可以利用非线性功率放大器, 避免了 W 频段卫星通信的输入功率补偿问题, 弥补了 W 频段发射功率较低的缺陷, 所以在 W 频段卫星通信中采用恒包络 OFDM 技术是一个很好的选择。

表 1 PAPR 比较

调制方式	$A_{\max}$	$\sigma_s^2$	$PAPR_{OFDM} / \text{dB}$	$PAPR_{CE-OFDM} / \text{dB}$
PSK	1	1	18.06	0
16QAM	$3\sqrt{2}$	10	20.61	0
64QAM	$7\sqrt{2}$	42	21.74	0

通过上述分析可以发现, 较传统的 OFDM 技术相比, CE-OFDM 最大的优势在于使信号的包络趋于水平, 解决了 W 高频段卫星通信功率补偿的问题。目前人们已经开始对 CE-OFDM 展开详细研究, S. C. Thompson. 和 A. U. Ahmed. 等人给出了 CE-OFDM 的基带模型<sup>[16]</sup>, 并对其在 AWGN 信道下的性能进行了仿真分析, 参调制方式为 8PAM, 子载波数  $N=128$ , 过采样因子  $C_{os}=4$ , 调制系数分别取 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.3、1.5, 仿真结果如图 3 所示。

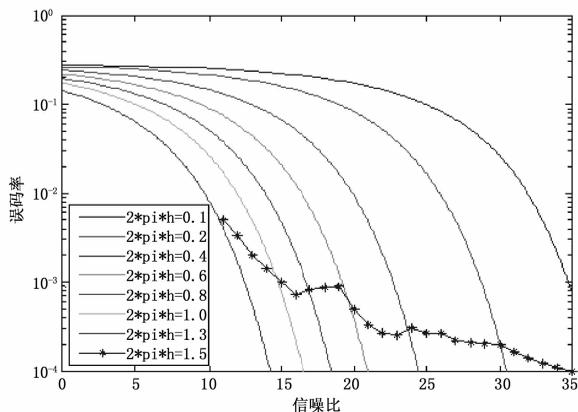


图 3 相位解调接收机在 AWGN 信道中的性能仿真

通过图 3 分析得出, CE-OFDM 的误码率与调制系数

$2\pi h$  有着密切的关系, 当调制系数小于 1.5 时, 系统的误码率随着调制系数的增大而提高, 但当调制系数大于等于 1.5 时, 将带来严重的相位跳变问题, 可见相位解调器存在很大的局限性。针对此问题, 文献 [19] 提出可以通过提高采样因子来弥补相位解调器带来的性能恶化, 但是大大增加了系统接收机的复杂度, 对于 W 频段来讲, 由于技术的限制, 接收机的具体设计还存在很多困难, 因此更适合 W 频段卫星通信的相位解调器还需要进一步研究。

随后, Thompson S C 团队又对比分析了 OFDM 和 CE-OFDM 的性能, 如图 4 所示, 图中采用的信道是军用信息模型中的经典信道, 其功率谱密度服从指数分布<sup>[19]</sup>, 载波数  $N = 64$ , OFDM 采用 QPSK 调制方式, CE-OFDM 调制方式与图 3 相同。

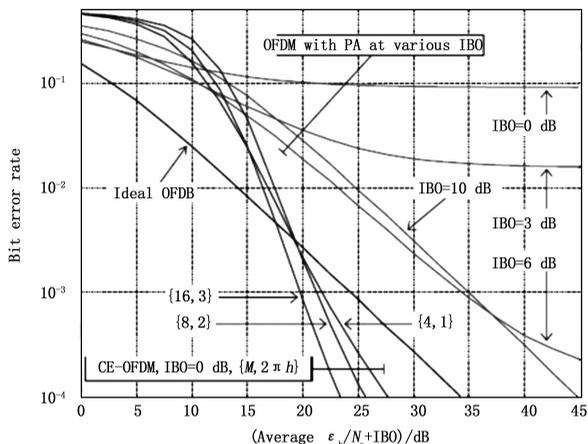


图 4 CE-OFDM 与 OFDM 性能比较

通过图 4 分析得出以下 3 点结论: 1) CE-OFDM 可以实现 0dB 功率补偿, 较 OFDM 相比提高了功率的利用率, 更重要的是降低了 W 频段发射机和放大器等设备的设计难度; 2) 在高信噪比条件下, CE-OFDM 较 OFDM 相比能够提供更小的误码率; 3) 调制阶数也影响着误码率的高低, 调制阶数越高, 误码率则越低, 当调制阶数为 16 时, 误码率可以达到 0.000 1, 然而, 对于相同的调制系数, 随着调制阶数的增大, 想要取得同样的误码率, 需要更高的信噪比, 这给 W 频段卫星的设备提出了更高的要求, 所以调制阶数的选取应该认真考虑。

#### 4 总结

在 W 频段进行卫星通信是一个很好的想法, 对于 OFDM 带来的非线性问题, 已经有了很多的解决方案, CE-OFDM 技术的提出解决了 PAPR 带来的非线性问题, 实现了在 W 频段卫星通信中 0 dB 功率补偿, 有着不错的应用前景。文章通过分析 CE-OFDM 的性能得出调制系数和调制阶数将直接影响系统的性能, 但是当调制系数过大时, 系统的性能发生了失真, 为了解决这一问题, 先进的相位解调器将成为下一步的一个研究重点, 同时调制系数也不能选取过大, 否则 W 频段设备的设计很难实现, 最后, 先进的交织编码技术也应成为 W 频段卫星通信中的一个研究重点。

#### 参考文献:

- [1] 蒋如冰, 夏 强. 无限接入控制关键技术研究进展综述 [J]. 计算机测量与控制, 2011 (2): 246-249.
- [2] Ibnkahla M, Rahaman Q M, Sulyman A I, et al. High-Speed satellite mobile communications: technologies and challenges [J]. Proceedings. IEEE, 2004, 92 (2): 312-339.
- [3] "Handbook on Satellite Communications", edited by International Telecommunication Union (ITU) [M]. 3<sup>rd</sup> edition, Wiley, New York (NJ): 2002.
- [4] Cianca E, Ruggieri M, Paraboni A. Experimental Aerospace Missions for EHF Communications [A]. GLOBECOM Workshops, 2008 IEEE [C]. IEEE, 2008: 1-6.
- [5] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 251-257.
- [6] 官 捷, 惠晓威. 正交频分复用系统的性能分析 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (4): 538-540.
- [7] 张海滨. 正交频分复用的基本原理与关键技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 6-7.
- [8] Banelli P. Theoretical analysis and performance of OFDM signals in nonlinear fading channels [J]. IEEE Transactions, 2003, 2 (2): 284-293.
- [9] Ochiai H. Power efficiency comparison of OFDM and single-carrier signals [J]. Proceedings. IEEE, 2002, 2: 899-903.
- [10] Li X, Cimini Jr L J. Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM [A]. Vehicular Technology Conference, 1997, IEEE 47<sup>th</sup> [C]. IEEE, 1997, 3: 1634-1638.
- [11] Wang X, Tjhung T T, Ng C S. Reduction of peak-to-average power ratio of OFDM system using a companding technique [J]. IEEE Transactions on, Broadcasting, 1999, 45 (3): 303-307.
- [12] 正交频分复用通信系统的峰比抑制方法 [P]. 中国, 专利号: ZL02112155. 9, 2004 年 6 月 2 日.
- [13] Muller S Huber J B. A comparison of peak power reduction schemes for OFDM [A]. Global Telecommunications Conference [C]. 1997, 1: 1-5.
- [14] Ahn H J, Shin Y, Im S. A block coding scheme for peak-to-average power ratio reduction in an orthogonal frequency division multiplexing system [A]. Vehicular Technology Conference Proceedings, 2000. VTC 2000-Spring Tokyo. 2000 IEEE 51<sup>st</sup> [C]. IEEE, 2000 1: 56-60.
- [15] 陈柏南, 周跃峰, 胡亮亮, 等. OFDM 系统中峰均比降低算法研究 [J]. 通信技术, 2003, (7): 29-31.
- [16] Thompson S C, Ahmed A U, Proakis J G, et al. Constant Envelope OFDM [J]. IEEE Transaction on Communications, 2008, 56 (8): 1300-1312.
- [17] Thompson S C, Ahmed A U, Proakis J G, et al. Constant Envelope OFDM phase modulation: spectral containment signal space properties and performance [J]. Proceeding. IEEE, 2004, 2: 1129-1135.
- [18] 吴 江, 吴伟陵. 未来无线通信中的单载波频域均衡技术 [J]. 数据通信, 2004 (5): 4-7.
- [19] Thompson S C. Constant Envelope OFDM Phase Modulation [D]. University of California, San Diego, 2005.