

文章编号:1001-893X(2012)09-1547-05

美军短波宽带数据通信标准的最新进展*

屠文超¹,江天娇²,叶向阳¹,郭友波³

(1.空军工程大学 信息与导航学院,西安 710077;2.空军司令部 信息化部 自动化站,北京 100843;
3.解放军 93811 部队 13 分队,兰州 730020)

摘 要:介绍了美军 MIL-STD-188-110 短波系列标准,重点描述了该系列标准的最新版本 110C,将该版本的调制、编码、交织等技术特征与 110B 进行了详细对比,对其在不同信道环境下的测试结果进行了分析,为我国短波宽带数据通信发展提供理论参考。
关键词:短波通信;宽带数据通信;110C 标准
中图分类号:TN915.04 **文献标志码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.09.026

Latest Development of US Wideband Standard for Data Communications over HF Radio

TU Wen-chao¹, JIANG Tian-jiao², YE Xiang-yang¹, GUO You-bo³

(1. Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. The Automation Workstation, Information Department of Air Force Headquarter, Beijing 100843, China;
3. Element 67, Unit 93811 of PLA, Lanzhou 730020, China)

Abstract: The series of US MIL-STD-188-110 standard are introduced with emphasis on the latest version of this series 110C. The modulation, coding, and interleaver are analysed and compared with the former version 110B in details. Performances under different channel conditions are analysed. All these researches can provide a theoretical reference for developing China's wideband HF data communication system.
Key words: HF communication; wideband data communication; 110C standard

1 引 言

短波通信具有组建开通快、抗毁能力强和维护费用低等特点,一直是世界各国重点发展的军事通信手段之一。美军作为世界短波通信标准发展的引领者,其短波通信标准被世界各国军方广泛研究和参考。自第一代短波通信标准于 20 世纪 80 年代制定,目前已经发展到第三代,技术特征呈现数字化和网络化。
MIL-STD-188-110 系列标准是美国国防部强制制定、适用于窄带和宽带短波战术通信系统的调制解调器技术标准,该标准可确保各平台之间的互操

作性,有效提升调制解调器性能,同时为新型调制解调器的设计提供参考。
目前,该系列标准共有 MIL-STD-188-110A/B/C 3 个版本,其中, MIL-STD-188-110A^[1] (正文部分以 110A 表示)和 MIL-STD-188-110B^[2] (正文部分以 110B 表示)标准为短波窄带数据通信标准,带宽和数据速率具有一定的局限性;最新版本的 MIL-STD-188-110C^[3] (正文以 110C 表示)标准重新定义了一系列短波宽带波形,这些宽带波形在 110B 标准的基础上增加了带宽,提高了数据速率和抗干扰能力,通信效能得到了有效提升。110C 也是世界上第一个完全意义上的短波宽带数据通信工业标准。

* 收稿日期:2012-03-27;修回日期:2012-05-16

2 MIL-STD-188-110 系列标准的发展

2.1 MIL-STD-188-110 系列标准介绍

MIL-STD-188-110 系列标准自 1991 年发布第一版以来,一直备受业界高度关注,我国也将其作为制定短波通信标准的基础和重要参考。随着应用需求的变化和技术的不断成熟,MIL-STD-188-110 系列标准也在不断地改进和完善,此后分别于 2000 年 4 月和 2011 年 9 月发布了该系列标准的第二版 110B 和第三版 110C。在 MIL-STD-188-110 系列标准的制定过程中,设计者们还参考了如 STANAG 4197^[4]等其他通信标准和协议,使 110 系列标准具有广泛的普适性。

110A 标准采用 1.5 kHz 带宽,调制方式为 8-PSK,数据速率在不加编码的条件下只有 4 800 bit/s,目前我国短波调制解调器标准大多以该标准为基础而建立。110B 标准是 110A 标准的升级版,加入了新的调制方式种类,带宽增加到 3 kHz,数据速率在不加编码的条件下最高可达 12 800 bit/s,基本满足了当时的需求。该标准采用了 FEC 纠错编码与交织编码,提高了纠错能力。与前两版相比较,110C 标准在技术上有了质的飞跃。该标准采用了宽带数据传输技术,最大带宽可达 24 kHz,最高数据速率也达到了 120 kbit/s,大大提高了数据传输的效能和可靠性。经过 20 多年的不断积累和发展,MIL-STD-188-110 系列标准已经成为了事实上的短波通信工业标准,对世界短波通信的发展具有深远影响。

2.2 MIL-STD-188-110C

2011 年 9 月 23 日,美国国防部正式颁布了由 Harris 和 Rockwell Collins 公司共同参与设计的 MIL-STD-188-110 系列标准的最新版本——110C。与 110B 标准中的短波窄带调制系统相比,110C 标准重新定义了以 3 kHz 为间隔、最大 24 kHz 带宽、最高数据速率 120 kbit/s(共计 33 种速率)的 13 种宽带调制波形。110C 标准对交织技术进行了优化,取消了 Very Short 和 Very Long 两种交织类型^[2],使交织深度的最短平均值为 0.12 s、最长平均值为 7.68 s。编码方面,采用了基于约束长度为 7 或 9 的卷积码^[5],利用去冗余和重复译码技术得到了最低 1/16、最高 9/10 的编码率^[6]。基于短波信道特性,用户可以依据不同的需求选择带宽和调制波形,使调制解调器的效能达到最优。目前,Harris 公司已设计出能够完全适应新型短波宽带数据通信标准的原型机,于 2010 年 6 月分别在 3 kHz、6 kHz、12 kHz 和 24 kHz 的带宽上对 110C 标准草案进行了模拟信道测试和空中性能测试^[7]。

110C 标准的颁布,从根本上改变了以窄带为主的短波数据通信体制,为短波通信全面跨入宽带通信时代打下了坚实的基础。

3 110C 标准调制特征

110C 标准相比于 110B 标准在调制技术方面有了很大程度的改进与提高^[6],主要体现在带宽、数据速率和调制方式上,这 3 个方面是调制解调的重要技术特征,并且三者之间具有紧密的联系。具体参数如表 1 所示。

表 1 短波宽带数据波形相关参数
Table 1 Wideband HF data waveforms parameter

BW/kHz	WID												
	0 Walsh	1 2-PSK	2 2-PSK	3 2-PSK	4 2-PSK	5 2-PSK	6 4-PSK	7 8PSK	8 16QAM	9 32QAM	10 64QAM	11 64QAM	12 256QAM
3	75	150	300	600	1 200	1 600	3 200	4 800	6 400	8 000	9 600	12 000	16 000
6	150	300	600	1 200	2 400	3 200	6 400	9 600	12 800	16 000	19 200	24 000	32 000
9	225	600	1 200	2 400	-	4 800	9 600	14 400	19 200	24 000	28 800	36 000	45 000
12	300	600	1 200	2 400	4 800	6 400	12 800	19 200	25 600	32 000	38 400	48 000	64 000
15	375	600	1 200	2 400	4 800	8 000	16 000	24 000	32 000	40 000	48 000	57 600	76 800
18	450	1 200	2 400	4 800	-	9 600	19 200	28 800	38 400	48 000	57 600	72 000	90 000
21	525	600	1 200	2 400	4 800	9 600	19 200	28 800	38 400	48 000	57 600	76 800	115 200
24	600	1 200	2 400	4 800	9 600	12 800	25 600	38 400	51 200	64 000	76 800	96 000	120 000

3.1 带宽选择

为满足应用需求,110C 标准基于最小3 kHz、最大24 kHz、3 kHz叠加的宽带信号,相比于 110B 标准采用3 kHz带宽的短波窄带信号,局限性大大降低,并且极大提高了数据传输的信息量,具有更大的带宽选择空间。

3.2 调制技术

与 110B 标准中 QPSK、8 – PSK、16 – QAM、32 – QAM、64 – QAM 调制方式相比,110C 标准在调制方式上增加了 Walsh 码、2 – PSK、4 – PSK 和 256 – QAM 等方式。以正交幅度调制方式为例,110B 标准中 64 – QAM 采用标准 8 × 8 正方形星座图的改进形式,较 110A 标准相比取得了更好的峰均比,而 110C 的 256 – QAM 采用了 16 × 16 圆形星座图,在同一坐标系内,点数越多代表采用该调制方式可以有效提高数据传输的信息量和频带利用率。

Walsh 码正交调制^[3]是 110C 标准中最新加入的基于 8 – PSK 不规则数据序列的一种调制方式。对编码和交织后的每 2 位比特而言,该方式能够产生基于 32 位符号的重复 Walsh 序列,Walsh 正交调制是通过对每2 bit数据选择相应的 Walsh 序列完成的,对应关系如表 2 所示。按照规则,二进制码经过 Walsh 正交调制后得到了八进制的 Walsh 序列,4 个 Walsh 序列重复 8 次后得到 32 位 Walsh 序列。假设二进制比特为 01,那么该序列 0404 重复 8 次后就变为 0,4,0,4,0,4,0,4,0,4,0,4,0,4,0,4,0,4,0,4,0,4,0,4,0,4,0,4,0,4,0,4。

为了便于识别,每个交织块的最后2 bit对应的 Walsh 序列规则有所不同,如表 2 中特殊 Walsh 序列规则所示。

表 2 Walsh 序列调制规则
Table 2 The rules of Walsh sequence

二位二进制码	Walsh 序列	特殊 Walsh 序列
00	0000	00004444
01	0404	04044040
10	0044	00444400
11	0440	04404004

3.3 数据速率

110B 标准在 3 kHz 带宽下所能提供的最高数据传输速率仅为9 600 bit/s,有一定的局限性;而基于

短波宽带数据通信的 110C 标准,共定义了 33 种数据速率,最高数据速率达到了120 kbit/s,极大改善了信息传输的效率。其中适用于天波传输的数据速率从75 bit/s到76.8 kbit/s,适于地波传输的数据速率为 12 ~ 120 kbit/s。

4 110C 标准交织与信道编码

4.1 交织选择

交织是通信系统中为对抗信道突发错误而采用的一种技术,就是在最大限度改变信息结果而不改变信息内容的条件下,使信道传播过程中由于突发干扰而导致的连续差错最大限度的分散化,将其转换成随机差错,有效提高接收端解码成功率。

110C 标准在交织技术上有了一定的改进^[3,6,8],如表 3 所示。一是优化了交织机制^[9]。110C 标准共定义了 4 种交织方式,相比 110B 标准而言做了一定的优化,这种优化主要是针对短波信道,省略了之前的超短波部分,使得目的更加明确。二是交织深度大幅降低,缩短了信道传输时延。由于 110C 标准取消了 VL (Very Long) 交织方式,因此最大交织 (Long Short) 深度仅为7.68 s,短交织 (Short) 和中交织 (Medium) 深度也分别为0.48 s和1.92 s,与 110B 标准中定义的交织深度相比有了明显的减小。其中,交织深度为0.12 s的极短交织 (Ultra Short) 仅适用于地波通信,深度为7.68 s的长交织仅适用于天波通信,短交织和中交织均适用于天波和地波通信。

表 3 交织选择
Table 3 Interleaver Options

交织类型	交织深度/s	
	110B	110C
Ultra Short(US)	0.12	0.12
Very Short(VS)	0.36	—
Short(S)	1.08	0.48
Medium(M)	2.15	1.92
Long(L)	4.31	7.68
Very Long(VL)	8.61	—

4.2 信道编码

为了抵消加性噪声、码间串扰等影响,除了合理选择调制方式外,110C 还通过采用信道编码技术来提高系统的抗干扰性^[3,9]。

由于受到某些技术专利的限制(例如 Turbo 码),110C 标准的信道编码技术沿用了 110A 标准中 1/2 编码效率、约束长度 $K = 7$ 或 $K = 9$ 的卷积编码。如图 1 所示为 $K = 7$ 的卷积编码示意图。

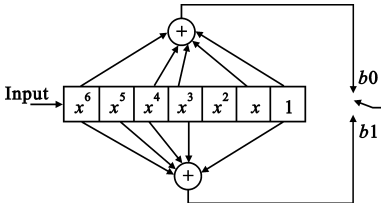


图 1 1/2 编码效率、约束长度为 7 的卷积编码示意图
Fig.1 Constraint length 7, rate 1/2 convolutional encoder

其中,多项式

$$(b0)T_1 = x^6 + x^4 + x^3 + x^1 + 1$$

$$(b1)T_2 = x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$$

为了进一步提升系统的编码效率,对卷积编码得到的码字进行去冗余处理,去冗余规则如表 4 所示^[10]。

以 $K = 7$ 为例,为了获得 3/4 系统编码率,卷积编码之后的码字每 3 比特中就有一位不能发送,假定 1 表示该比特将被发送,0 表示不发送,那么所用掩码为 110、101,其中,110 和 101 分别对应 b0 和 b1 码流。

表 4 去冗余规则

Table 4 Puncture and repetiton patterns			
编码率	$K = 7$	$K = 9$	重复次数
9/10	111101110	111000101	n/a
	100010001	100111010	
8/9	11110100	11100000	n/a
	10001011	10011111	
5/6	11010	10110	n/a
	10101	11001	
4/5	1111	1101	n/a
	1000	1010	
3/4	110	111	n/a
	101	100	
2/3	11	11	n/a
	10	10	
9/16	111101111	111101111	n/a
	111111011	111111011	
1/2	n/a	n/a	n/a
2/5	1110	1110	1/2 Repeated 2x
	0111	1010	
1/3	n/a	n/a	2/3 Repeated 2x
	1111	1111	
2/7	0111	0111	1/2 Repeated 2x
	1111	1111	
1/4	n/a	n/a	2/3 Repeated 2x
1/6	n/a	n/a	1/2 Repeated 3x
1/8	n/a	n/a	1/2 Repeated 4x
1/12	n/a	n/a	1/2 Repeated 6x
1/16	n/a	n/a	1/2 Repeated 8x

经过去冗余处理,110C 标准所规定的各波形对应的系统编码率如表 5 所示。

表 5 MIL – STD – 188 – 110C 标准系统编码率
Table 5 The code rate of MIL – STD – 188 – 110C

BW/ kHz	WID													
	0 Walsh	1 BPSK	2 BPSK	3 BPSK	4 BPSK	5 BPSK	6 QPSK	7 8PSK	8 16QAM	9 32QAM	10 64QAM	11 64QAM	12 256QAM	13 QPSK
3	1/2	1/8	1/4	1/3	2/3	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	8/9	8/9	9/16
6	1/2	1/8	1/4	1/3	2/3	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	8/9	8/9	
9	2/3	1/8	1/4	1/2	–	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	8/9	8/9	
12	1/2	1/8	1/4	1/3	2/3	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	8/9	8/9	
15	2/5	1/12	1/6	1/3	2/3	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	8/9	8/9	
18	2/3	1/8	1/4	1/2	–	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	8/9	5/6	
21	2/7	1/16	1/8	1/4	1/2	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3	4/5	9/10	
24	1/2	1/8	1/4	1/3	2/3	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	8/9	5/6	

5 110C 标准信道性能测试

110C 标准是由 Harris 公司和 Rockwell Collins 公司共同设计完成的,标准在制定过程中主要是对带宽为 3 kHz、6 kHz、12 kHz 和 24 kHz、约束长度为 7 或

9 的波形在高斯白噪声信道(AWGN)、中纬度干扰信道(MLDC)中进行模拟信道的测试^[6]和空中性能测试^[7]。因为短波信道具有时变性,在时延、误码率等方面对数据的传输有一定的影响,因此测试的主要

目的是对 110C 标准在沿用 110A 编码方式后依然可以取得较好的编码效果,获得良好的信噪比。

根据发布的测试结果^[6],约束长度为 7 的卷积码在带宽为 12 kHz 的高斯白噪声信道下的性能测试结果与 110B 标准附录 C 的波形性能相同,4 个测试带宽下的信噪比均在 0.5 dB 内;约束长度为 9 的卷积码在上述条件下的信噪比为 1 dB。在中纬度干扰信道下,约束长度为 7 的卷积码的信噪比维持在 1 dB 内,约束长度为 9 的卷积码的信噪比最大能达到 1 dB。

可见,在以上两种信道环境下,约束长度为 9 的卷积码比约束长度为 7 的卷积码在性能上具有一定的优势,同时也说明了 110C 标准在沿用 110A 的编码方式后能够取得很好的编码效果。

6 结 语

当前,短波数据通信正随着信息技术进步和军事应用需求的扩展而快速发展。110C 标准改变了传统意义上的短波数据通信体制,将宽带技术应用到短波通信中,大大提高了数据传输的效能和可靠性。本文通过介绍美军 110C 标准的调制特征、交织与信道编码等重要技术,将该标准与 110B 标准进行了比较与分析,指出了 110C 标准的技术优势,为我国短波宽带数据通信的发展提供了一个很好的参照。随着短波宽带数据调制技术的发展,美军和北约已开始着手研制基于 110C 标准的新型短波通信设备。在未来对短波通信标准的研究中,如何吸收最新技术和优秀成果,获取有益借鉴,是今后的研究重点。

参考文献:

[1] MIL - STD - 188 - 110A, Interoperability and Performance Standard for Data Modems[S].
[2] MIL - STD - 188 - 110B, Interoperability and Performance Standard for Data Modems[S].
[3] MIL - STD - 188 - 110C, Interoperability and Performance Standard for Data Modems[S].
[4] STANAG 4197, Modulation and Coding Characteristics That Must Be Common to Assure Interoperability of 2400 BPS Linear Predictive Encoded Digital Speech Transmitted over HF Radio Facilities[S].

[5] 达新宇,陈树新,王瑜,等.通信原理教程[M].北京:北京邮电大学出版社,2005:278 - 281.
DA Xin-yu, CHEN Shu-xin, WANG Yu, et al. Communication Theory Tutorial [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005: 278 - 281. (in Chinese)
[6] 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.
[7] Furman W N, Nirtto J. On-Air Testing of a Wideband HF Data Modem[C]//Proceedings of The Nordic Shortwave Conference. Edinburgh: [s. n.], 2009: 74 - 76.
[8] 李式巨,姚庆栋,赵民建.数字无线传输[M].2 版.北京:清华大学出版社,2007:171 - 173.
LI Shi-ju, YAO Qing-dong, ZHAO Min-jian. Digital Wireless Transmission[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 171 - 173. (in Chinese)
[9] Nieto J, Coding and Interleaving Options for Wideband HF Waveforms[C]//Proceedings of the Nordic Shortwave Conference HF10. Sweden: [s. n.], 2010: 74 - 76.
[10] Yasuda Y, Kashiki K, Hirata Y. High-Rate Punctured Convolutional Codes for Soft Decision Viterbi Decoding[J] IEEE Transactions on Communications, 1984, 32(3): 315 - 319.

作者简介:

屠文超(1988—),男,北京人,硕士研究生,主要从事短波数据通信方面的研究;

TU Wen-chao was born in Beijing, in 1988. He is now a graduate student. His research concerns data communications over HF radio.

Email: tuwenchao. frame@gmail. com

江天娇(1989—),女,江西南昌人,助理工程师,主要从事通信网络建设方面的研究;

JIANG Tian-jiao was born in Nanchang, Jiangxi Province, in 1989. She is now an assistant engineer. Her research concerns communication network construction.

叶向阳(1970—),男,湖北黄冈人,高级实验师,主要从事卫星通信和短波通信方面的研究;

YE Xiang-yang was born in Huanggang, Hubei Province, in 1970. He is now a senior experimentalist. His research concerns satellite communication and HF communications.

郭友波(1971—),男,湖北潜江人,工程师,主要从事通信网络管理方面的研究。

GUO You-bo was born in Qianjiang, Hubei Province, in 1971. He is now an engineer. His research concerns management of communication network.