

基于交织的错误图样对 DVB-S 协议级联码译码性能的影响

王东明, 张君毅

(中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081)

摘要: 信道编码技术在保证数字通信系统可靠传输方面具有重要作用, 随着数字电视广播的覆盖不断提升, 不法分子利用数字电视广播从事非法活动的情况时有发生; 为了在信道编码层面为无线电环境管理提供技术手段, 改进编码方式, 提高数字通信系统传输可靠性, 以 DVB-S 协议标准中物理层级联码作为研究对象, 建立了由 RS 码、卷积码和卷积器交织器构成的典型级联码的通信模型, 深入分析了级联码的体系结构, 并在编码体制上找到了 DVB-S 协议标准中级联码存在的弱点, 设计了一种基于交织的错误图样, 给出了设计思路 and 具体设计方法, 仿真研究了错误符号中含有不同错误比特数的错误图样对级联码译码性能的影响, 并与突发错误图样进行了对比; 仿真结果表明, 基于交织的错误图样对级联码的译码性能影响要大于突发错误。

关键词: 级联码; 交织; 错误图样

Influence of Interlaced Error Patterns On Decoding Performance of DVB-S Protocol Concatenated Codes

Wang Dongming, Zhang Junyi

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Channel coding technology plays an important role in guaranteeing the reliable transmission of digital communication system. With the continuous improvement of the coverage of digital TV broadcasting, illegal activities involving illegal digital TV broadcasting occur frequently. In order to provide technical means for radio environment management at the channel coding level, improve the coding mode and transmission reliability of the digital communication system, the error pattern is proposed: take the physical level code in the DVB-S protocol standard as the research object, establish a communication model consisting of RS codes, convolutional codes and convolutional interleaver, analyze the architecture of concatenated codes, find the weakness of the DVB-S protocol standard of concatenated codes exist in the encoding system. An error pattern based on interleaving is designed, giving the design ideas and specific design methods. Compared with burst error pattern, the effect of the error pattern with different number of error bits in error symbols of concatenated codes decoding performance is simulated. The simulation results show that the interlaced error pattern has a greater impact on the decoding performance of the concatenated code than the burst error.

Keywords: concatenated code; interleave; error pattern

0 引言

在信道编码中, 纠错性能的提高往往意味着译码复杂度的增加, 级联码通过将两种短码级联来构造长码, 在不显著增加设备复杂度的情况下提高了纠错性能。级联码凭借其优异的性能被选作深空通信、卫星通信等众多系统的信道编码方案。

随着数字电视广播的覆盖不断提升, 出现了不法分子利用数字电视广播从事非法活动的情况。研究不同错误图样对级联码译码性能的影响可以在信道编码层面为无线电环境管理提供技术手段, 对于改进编码方式也具有重要意义。

本文选取了 DVB-S 协议标准中物理层采用的级联码方案作为研究对象进行研究, 研究了级联码的基本结构, 建立了级联码的纠错模型并进行了深入分析, 从级联码的编码体制上分析了其可能存在的脆弱性, 并以此为基础设计了一种基于交织的错误图样, 以突发错误图样作为参照, 对比研究了这种错

误图样对级联码译码性能的影响。仿真结果表明, 基于交织的错误图样会对级联码的译码性能产生比突发错误图样更加巨大的影响。

1 级联码通信模型

本级联码就是使用多级 (一般情况下是两级) 编码进行级联的一种编码方式, 级联码分为并行级联码和串行级联码。本文研究的 DVB-S 协议标准下的级联码是一种非常典型的串行级联码。串行级联码通常采用的是两级编码方式, 两级子码分为外码与内码。其中和信道以及调制器互连接的是内码的编译码器, 是更靠近信道的内层, 它的作用是将大部分的信道误码加以改正, 更靠近信源和信宿的外码其主要作用是使编码的差错概率降低到指定的程度。DVB-S 协议中使用的前向纠错码是由 RS 码和卷积码级联组成的级联码, RS 码作为外码, 卷积码作为内码, 中间通过卷积交织器进行连接, 结构如图 1 所示。

一个长度为 K 的信息序列经过信源编码和调制之后可以表示为:

$$V = (v_1, v_2, \dots, v_k) \quad (1)$$

这里的每个符号都是由 8 个比特构成的, 然后首先经过 RS 码的编码器进行编码, RS 码编码器可以看做是一个

收稿日期: 2018-01-03; 修回日期: 2018-01-18。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2015AA01A707)。

作者简介: 王东明(1991-), 男, 河北石家庄, 硕士研究生, 主要从事信道编码方向的研究。

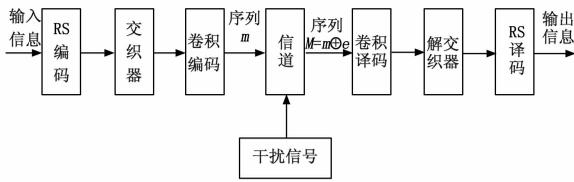


图 1 DVB-S 协议标准中级联码通信结构

$f_{RS}(x)$ 函数, 经过 RS 编码器后的信息序列变为:

$$C^{RS} = f_{RS}(V) = (c_1^{RS}, c_2^{RS}, \dots, c_N^{RS}) \quad (2)$$

长度变为 N , 然后会经过卷积交织器, 卷积交织器只改变编码序列中符号的位置, 可以用 $f_{int}(x)$ 来表示, 经过交织器后的序列可以表示为:

$$C^{int} = f_{int}(V) = (\dots, c_1^{int}, \dots, c_2^{int}, \dots, c_N^{int}, \dots) \quad (3)$$

相邻的符号经过交织之后会分散开来。 C^{int} 中的每个符号都可以表示为比特, 即:

$$\begin{aligned} c_1^{int} &= (c_{1,1}^{int}, c_{1,2}^{int}, \dots, c_{1,8}^{int}) \\ c_2^{int} &= (c_{2,1}^{int}, c_{2,2}^{int}, \dots, c_{2,8}^{int}) \\ &\vdots \\ c_N^{int} &= (c_{N,1}^{int}, c_{N,2}^{int}, \dots, c_{N,8}^{int}) \end{aligned} \quad (4)$$

经过交织器之后的序列会进入卷积编码器在比特层面上进行卷积码编码, 得到:

$$C^{CC} = f_{CC}(C^{int}) = (c_1^{CC}, c_2^{CC}, \dots, c_{\frac{Nn}{k}}^{CC}) \quad (5)$$

经过卷积编码器之后的序列在传输过程中会遇到干扰, 导致序列中出现比特错误 $E = (e_1, e_2, \dots, e_u)$, 错误长度为 $u \leq \frac{Nn}{k}$ 。

在序列 E 中, 认为 $e_i = 0$ 时, 对应位置的原序列 C^{CC} 不出现错误, 当 $e_i = 1$ 时, 对应位置的原序列 C^{CC} 出现比特错误。在序列 E 中 1 的分布符合一定规律, 若序列 E 中 1 是随机分布的, 就称为是随机错误图样, 若序列 E 中存在连续的 1, 就称为是突发错误图样, 其中连续的 1 的个数就是突发长度。

接收端接收到的序列 S 是序列 C^{CC} 和错误图样 E 的叠加, 即:

$$S = C^{CC} \oplus E = (\dots, c_i^{CC} + e_1, c_{i+1}^{CC} + e_2, \dots, c_{i+u}^{CC} + e_u \dots) \quad (6)$$

序列首先 S 进入卷积码译码器进行译码, 编译码可以看做是一个逆向的过程, 经过卷积码译码器后可以得到:

$$S^{CC} = f_{CC}(S)' = (s_1^{CC}, s_2^{CC}, \dots, s_N^{CC}) \quad (7)$$

当错误图样 E 中的错误个数和分布处于卷积码纠错能力 t' 内时, 卷积码可以正确译码, 得到的 $S^{CC} = C^{int}$, 当超出卷积码的纠错能力时, S^{CC} 中依然含有错误, 然后会经过解交织器, 解交织器会把交织器打乱的序列顺序恢复回来, 得到:

$$S^{int} = f_{int}(S^{CC})' = C^{RS} \oplus E' = (c_1^{RS}, c_2^{RS}, \dots, c_i^{RS} + e'_1, c_{i+1}^{RS} + e'_{i+1}, \dots, c_N^{RS}) \quad (8)$$

S^{int} 会被输入到 RS 码译码器, 进行译码, 得到最终的结果:

$$S^{RS} = f_{RS}(S^{int})' \quad (9)$$

当 E' 中存在的错误个数和分布处于 RS 码的纠错能力范围内时, 得到译码之后的序列 $S^{int} = V$, 当 E' 中存在的错误个数和分布处于 RS 码的纠错能力范围内时, 得到译码之后的序

列 S^{int} 与原信息序列不相等, 产生译码错误。

2 DVB-S 协议标准中级联码的脆弱性分析

分析 DVB-S 协议标准中级联码的编码结构可以发现, 对于外码 RS 码和内码卷积码来说, 信道中产生的干扰对其纠错性能不会有针对性的影响, DVB-S 协议标准中级联码采取的卷积交织器是对符号进行交织的, 接收方的解交织器本质上也是一种交织器, 同样也是改变符号的顺序, 将信道中和卷积码译码产生的突发错误打散, 分散到多个 RS 码字内进行纠错, 通过前文的分析可以看到, 这种方法很有效果, 但是解交织器的存在也可能产生负面的效果。

对于解交织器 $f_{int}(x)'$, 会改变输入的信息序列顺序, 得到的输出序列是:

$$S^{int} = f_{int}(S^{CC})' = C^{RS} \oplus E' = (c_1^{RS}, c_2^{RS}, \dots, c_i^{RS} + e'_i, c_{i+1}^{RS} + e'_{i+1}, \dots, c_N^{RS}) \quad (10)$$

若卷积码译码产生错误, 则 S^{int} 与 S^{CC} 中都存在错误, 即:

$$S^{CC} = C^{RS} \oplus E_1 \quad (11)$$

$$S^{int} = C^{RS} \oplus E_2 \quad (12)$$

E_1 中 E_2 含有的错误数目相同, 错误位置的分布不同。由于交织器和接收端的解交织器都是具有固定间隔的, 这样就存在一种可能性, 分散在不同位置的随机错误比特有可能会通过解交织过程集中在一起, 也就是:

$$E_1 = (\dots, e'_i, \dots, e'_{i+1}, \dots, e'_{i+2}, \dots) \quad (13)$$

$$E_2 = (\dots, e'_i, e'_{i+1}, e'_{i+2}, \dots) \quad (14)$$

在这种情况下, 在进入 RS 码译码器的序列中含有的错误会集中起来, 虽然 RS 码具有纠正突发错误的能力, 但是这种情况下可能在一个 RS 码字内存在超过 RS 码纠错能力的错误符号数时, RS 码的译码器输出就会产生错误, 进而对级联码的译码性能产生影响。这种情况可以通过图 2 进行演示。分散的随机错误符号, 通过解交织器改变位置, 重新组合成几个连续的错误符号, 变成一个突发错误。这种情况下, 有可能很少的错误符号个数, 由于都集中在一个 RS 码字内, 超出了 RS 码字的纠错性能, 进而对整个级联码系统造成影响, 使得整个级联码系统译码出现问题。

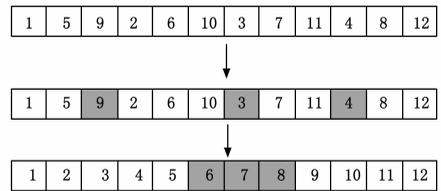


图 2 解交织将随机错误集中示意图

解交织器输入输出序列的符号位置分布与解交织器的支路数 B 和每个支路延迟的符号周期 J 有关系。对于一个具有 B 个支路, 每个支路延时 J 个符号周期的卷积交织器来说, 每条支路的延时的符号周期可以表示为: $d_i = (i-1)JB, i = 1, 2, \dots, B$; 交织前序列中相邻的两个符号经过交织器之后间隔增加为 JB 个符号周期, 交织器输入序列中间隔小于 JB 个符号周期的两个符号在输出序列中最小的间隔变为 B 个符号周期。

解交织的每条支路延迟 $d_i = (B-i)JB, i = 1, 2, \dots, B$ 。序列经过交织和解交织操作导致的总时延为 $(B-1)JB$ 个符号周期。若 $E_1 = (\dots, e'_i, e'_{i+1}, \dots, e'_{i+u}, \dots)$ 中存在的连续错误符号个数 $u < J$, 那中 E_1 的连续错误符号会 E_2 在中变为单个的错

误, 这时:

$$E_2 = (\dots, e'_{2,i}, \dots, e'_{2,i+JB}, \dots, e'_{2,i+2JB}, \dots, e'_{2,i+uJB}, \dots) \quad (15)$$

这里的 $e'_{2,i+JB} = e'_{i+1}, j = 0, 1, 2, \dots, u$ 。当中 E_1 含有间隔为 $JB + 1$ 周期性单位错误时,

$$E_1 = (\dots, e'_i, \dots, e'_{i+JB+1}, \dots, e'_{i+2(JB+1)}, \dots) \quad (16)$$

经过解交织器之后的中会出现长度为 B 的连续错误。

$$E_2 = (\dots, e'_i, e'_{i+1}, \dots, e'_{i+B}, \dots) \quad (17)$$

级联码的这种特性可能使得很小的干扰就对级联码译码产生严重的影响, 为了测试这种情况下的级联码的抗干扰能力, 设计了一种基于交织的错误图样。

3 基于交织的错误图样设计

基于交织的错误图样设计思路是在之前对于级联码纠错模型分析的基础上利用符合交织器延迟规律分布的错误, 经过解交织器的作用在一个 RS 码字内拼接多个错误, 使其集中超出 RS 码纠错能力的错误, 进而在比较小的输入误码率时对级联码产生较大影响。

基于交织的错误图样 E' 通过信道进入系统, 叠加到卷积码译码器的输入端 $S = C^c \oplus E'$, 级联码的两层编码结构和错误图样进入系统的位置使得错误图样 E' 只能对内层编码的输入产生影响, 若要对整个级联码系统产生影响, 需要满足 3 个条件。

- 1) 错误图样含有的错误超过了内层编码卷积码的纠错能力;
- 2) 卷积解交织器的输入错误符号位置可控;
- 3) RS 码译码器输入含有的错误符号超出了 RS 码的纠错能力。

对于卷积码来说, 准确控制干扰位置是很困难的。由于采用维特比译码算法, 通过控制译码器比特输入的错误位置来精确控制译码后的比特位错误位置几乎是不可能的。维特比译码是一种概率译码, 当译码失效时, 译码器输入的错误位置与输出的错误位置没有直接的关系, 所以通过输入的错误位置来控制输出的错误位置是很难的。而要控制输入的错误位置在实现时需要干扰脉冲在比特级的层面上对错误位置进行控制, 在实际应用中这也是不现实的。

虽然比特级的干扰位置控制很困难, 卷积码译码的错误位置也不可控制, 但是由于级联码的特性, 在符号级进行错误位置控制还是有可能的。对于经过 RS 码和卷积交织之后的序列 C^{int} , 其中的每个符号都可以表示为比特, 即:

$$\begin{aligned} c_1^{int} &= (c_{1,1}^{int}, c_{1,2}^{int}, \dots, c_{1,8}^{int}) \\ c_2^{int} &= (c_{2,1}^{int}, c_{2,2}^{int}, \dots, c_{2,8}^{int}) \\ &\vdots \\ c_N^{int} &= (c_{N,1}^{int}, c_{N,2}^{int}, \dots, c_{N,8}^{int}) \end{aligned} \quad (18)$$

序列 C^{int} 会进入卷积编码器在比特层面上进行卷积码编码, 得到:

$$C^{cc} = f_{cc}(C^{int}) = (c_1^{cc}, c_2^{cc}, \dots, c_k^{cc}) \quad (19)$$

对于交织后的一个符号 c_i^{int} 来说, 经过卷积编码, 它的长度变成了原来的 n/k 倍。若维特比译码产生错误时, 可能会产生突发错误 $E^v = (e_1, e_2, \dots, e_u)$, 这里 u 的长度一般小于一个 RS 码字内含有的比特数, 所以当错误图样中含有的错误大于卷积码的纠错能力时, 认为一个 RS 码的符号产生的错误。也就是说, 虽然不能在比特级的层面上对错误位置进行控制, 但

是在符号级上对卷积码译码输出的错误位置控制是可行的。

基于交织的错误图样 $E' = (\dots, e''_i, \dots, e''_{i+1}, \dots, e''_{i+2}, \dots)$, 这里的 e''_i 代表着符号, 每个中 e''_i 含有 $8n/k$ 个比特,

$$e''_i = (e''_{i,1}, e''_{i,2}, \dots, e''_{i, \frac{8n}{k}}) \quad (20)$$

在设计时, e''_i 中含有 le' 个比特 1, 考虑到实际情况, 这些比特 1 在 e''_i 中位置随机分布, 当 $le' > t'$ 时, 卷积码译码出现错误, 但在比特级上错误位置不确定, 这时的错误图样变为:

$$E''_s = (\dots, e''_{s_i}, \dots, e''_{s_{i+1}}, \dots, e''_{s_{i+2}}, \dots) \quad (21)$$

E''_s 与 E'' 在符号级上的位置分布一致, 但是:

$$e''_{s_i} = (e''_{s_i,1}, e''_{s_i,2}, \dots, e''_{s_i,8}) \quad (22)$$

每个符号为 8 个比特, e''_{s_i} 中含有的比特 1 的个数和位置不固定, 但是对于 RS 码的译码器来说, 都认为是一个符号的错误。这就意味着卷积解交织器的输入错误符号位置是可控的。

控制卷积解交织器的输入错误符号位置就可以控制 RS 码译码器的输入错误位置。根据解交织器的输入输出位置规律设计基于交织的错误图样在符号上的分布, 错误符号的分布是以间隔 $JB + 1$ 为周期的单位错误,

$$E' = (\dots, e''_i, \dots, e''_{i+JB+1}, \dots, e''_{i+2(JB+1)}, \dots) \quad (23)$$

经过解交织器之后的中会出现长度为 B 的连续错误。也就是 RS 码的输入序列中含有长度为 B 的连续错误。

$$\begin{aligned} S^{int} = f_{int}(S^c)' = C^{RS} \oplus E' = \\ (c_1^{RS}, c_2^{RS}, \dots, c_i^{RS} + e''_i, c_{i+1}^{RS} + e''_{i+1}, \\ \dots, c_{i+B}^{RS} + e''_{i+B}, \dots, c_N^{RS}) \end{aligned} \quad (24)$$

在一个 RS 码字内有超出 RS 码纠错性能的错误符号时, RS 码的译码输出会受到严重影响。基于交织的错误图样对级联码译码性能的影响与每个符号内含有的错误比特数 le' 有关。

4 仿真结果分析

仿真时按照 DVB-S 协议标准采取了 (204, 188, 8) RS 码和 (2, 1, 7) 卷积码级联的结构。交织采用卷积交织, 交织支路数 $B = 12$, 每个支路延时 $M = 17$ 。在仿真时, 选取了 50 个 RS 码字组成比特流进行仿真。这里只在编码信道下进行了仿真, 并未考虑调制和解调的影响。对每个错误符号内含有的错误比特数为 5、6、7、8 比特时对级联码纠错性能影响进行了仿真, 仿真结果如图 3。

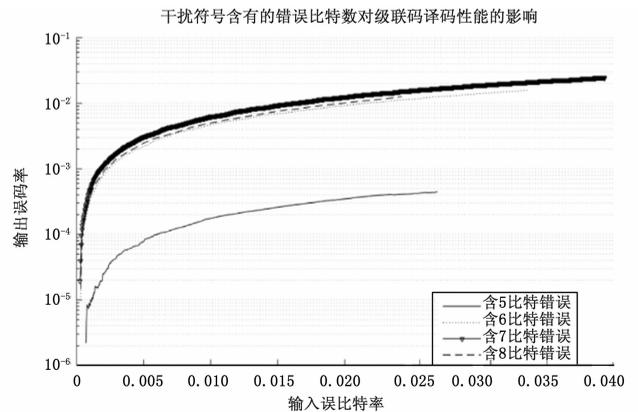


图 3 含有不同错误比特数的基于交织的错误图样对级联码纠错性能的影响

卷积码的纠错能力为 $t = (d_{free} - 1)/2$ 。对于 DVB-S 使用的卷积码, 在不进行删余的情况下其自由距离为 $d_{free} = 10$, 纠错能力 $t = 4$, 当含有的错误比特数小于 5 的时候, 处于卷积码的纠

错范围内, 所以所有的错误都会被纠正, 并不产生误码。

当每个干扰符号内含有超过 5 比特错误时候, 基于交织的错误图样对卷积码的纠错性能影响相差不大, 含有小于 5 比特错误时, 级联码的译码输出不会产生错误, 所有的错误都在级联码的纠错范围内, 错误被纠正。此时正是由于每个错误符号内含有的错误比特数小于内码卷积码的纠错能力, 或者卷积码译码产生的错误依然在 RS 码的纠错范围内的情况, 所以不产生误码率。

当每个符号内含有 5 比特错误时, 级联码的译码性能受到影响, 但是影响并不是很大, 这是因为对于卷积码来说, 错误图样的随机分布导致存在某一段比特内错误较少的情况, 依然有一些卷积码进行正确的译码, 所以对级联码的影响较小。

当每个符号内含有超过 5 比特错误时, 此时的错误完全超过了卷积码的纠错能力, 在局部造成了较高的输入误码率, 级联码的纠错性能受到较大影响, 错误符号内含有 6 比特、7 比特和 8 比特错误时的性能表现相近, 其中 7 比特时性能表现最差。此时对级联码的纠错性能影响最大。

为了研究基于交织的错误图样对级联码译码性能影响的效果, 以突发错误图样作为参照做了对比仿真研究。突发错误图样 $E' = (\dots, e'_i, e'_{i+1}, \dots, e'_{i+l}, \dots)$, e'_i 表示的是比特 1, l 是突发错误图样的突发长度, E' 内含有多个连续的比特 1, 突发的位置随机分布。

仿真时外码采用 (204, 188) 的 RS 码, 内码采用 (2, 1, 7) 的卷积码, 交织器支路数为 12, 每条支路延迟时间为 17 个符号周期。基于交织的错误图样使用宽度为 16 比特的干扰符号, 每个干扰符号内含有和突发错误图样相同的错误比特数, 错误比特数的位置随机, 来与突发干扰图样进行对比。对比时保证 $le = le'$ 。仿真结果如图 4~图 6 所示。

含 6 比特错误的基于交织的错误图样和突发错误图样对级联码的影响

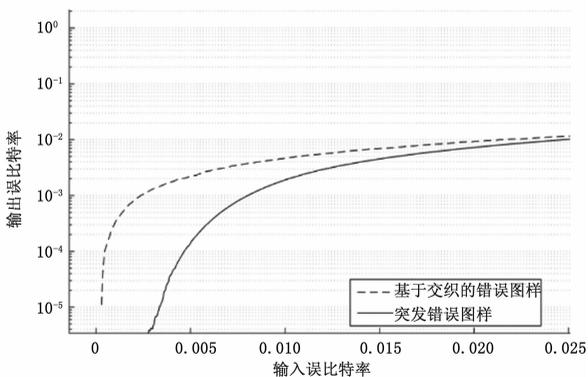


图 4 $le = 6$ 两种错误图样对比

通过对比可以看出, 基于交织的错误图样对级联码的影响要大于突发错误图样的影响, 在每个符号内含有的错误比特数与突发错误长度相同时, 基于交织的错误图样对级联码的影响要大, 可以用较小的输入误比特率对级联码产生较大的影响。级联码对于这种基于交织的错误图样具有较差的抗干扰能力。

5 结论

本文对 DVB-S 协议标准中使用的级联码进行了介绍, 并对其体制上可能存在的脆弱性进行了深入分析, 在此基础上设计了一种基于交织的错误图样。同时对基于交织的错误图样与突发错误图样对级联码的影响进行了仿真分析, 仿真结果证明, 在基于交织的错误图样中含有的错误比特数与突发错误长

含 7 比特错误的基于交织的错误图样和突发错误图样对级联码的影响

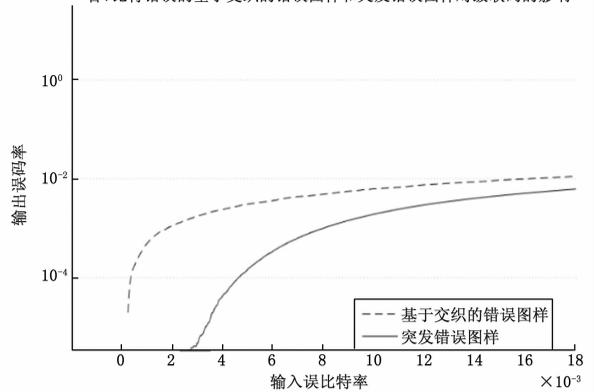


图 5 $le = 7$ 两种错误图样对比

含 8 比特错误的基于交织的错误图样和突发错误图样对级联码的影响

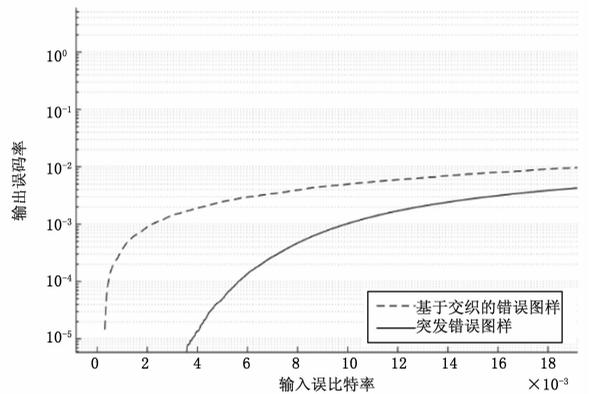


图 6 $le = 8$ 两种错误图样对比

度相等时, 相对于突发错误图样, 基于交织的错误图样对级联码的纠错能力会产生更大的影响。同时, 错误图样与调制的结合还需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 王新梅, 肖国镇. 纠错码—原理与方法 (第二版) [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [2] 屈超. DVB-S 信道解码及 FPGA 实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [3] 郝天铎, 王可人, 金虎, 等. 泊松分布的错误图样对纠错码译码性能的影响 [J]. 火力与指挥控制, 2016, 41 (1): 96-100.
- [4] 尚庆华, 辛利. 对典型级联码的纠错性能分析和干扰方法研究 [J]. 通信对抗, 2013 (2): 21-24.
- [5] 郝天铎, 王可人, 金虎, 等. 不同错误图样分布对 RS 码译码性能的影响 [J]. 无线电工程, 2015 (8): 15-18.
- [6] 赵文景, 李新付. RS+卷积级联码抗脉冲干扰性能研究 [J]. 通信对抗, 2016 (4): 26-29.
- [7] 杜宇峰, 刘丰. 针对前向纠错编码的脉冲干扰技术研究 [J]. 无线电工程, 2013, 43 (7): 17-20.
- [8] 续晓光. FFH 系统中的级联码关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [9] Liebetreu J. FEC Performance of Concatenated Reed-Solomon and Convolutional Coding with Interleaving [J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2011.
- [10] 白婷, 贾明雁, 张东亮, 等. 串行级联编码在遥测系统中的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (5): 1187-1189.