

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.02.004

引用格式:肖金光,周新力,张焯.一种海洋蒸发波导通信带限信道建模方法[J].电讯技术,2015,55(2):135-140.[XIAO Jinguang,ZHOU Xinli,ZHANG Ye. A Bandwidth Channel Modeling Method for Sea Evaporation Duct Communication[J]. Telecommunication Engineering, 2015,55(2):135-140.]

一种海洋蒸发波导通信带限信道建模方法*

肖金光**,周新力,张焯

(海军航空工程学院 电子信息工程系,山东 烟台 264001)

摘要:针对海洋蒸发波导中多径信号场强计算和时延估计问题,提出了一种通信带限信道建模方法。给出了一种分段的射线追踪算法,提出了多径到达信号分离和场强计算的方法,考虑了电波空间扩散、粗糙海面反射和接收球;研究了时延估计规律、系统设计和策略。数值试验验证了建立的带限冲激响应建模方法的可行性,为海洋蒸发波导通信的链路预算和性能分析提供了有效的途径,通过控制信号频率、带宽和能量正余量可达到预期系统性能。

关键词:蒸发波导通信;射线追踪;多径信号;场强计算;带限信道模型

中图分类号:TN011.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)02-0135-06

A Bandwidth Channel Modeling Method for Sea Evaporation Duct Communication

XIAO Jinguang,ZHOU Xinli,ZHANG Ye

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

Abstract:To compute the field and estimate the time delay of multi-path signal in sea evaporation duct (SED),a method of modeling communication bandwidth channel is presented. Algorithm of ray tracing in subsections is proposed. A method of separating arriving multi-path signal and computing field is put forward,considering space wave diffusion,rough surface reflection and reception sphere. Characteristics of time delay estimation,system design and strategies of usage are studied. Feasibility of the constructed method is verified by numerical experiments. The new method provides an effective way of link budget and performance analysis in SED communication to get expectable performances,with proper selection of signal frequency,bandwidth and energy surplus.

Key words:evaporation duct communication;ray tracing;multi-path signal;field computation;bandwidth channel model

1 引言

海面上蒸发波导(Evaporation Duct,ED)发生概率较高,能够陷获频率和仰角满足一定条件的电磁波,形成超视距传播,对于雷达探测、通信、电子对抗以及低高度武器或平台的攻防都具有重要意义。其中利用波导进行通信可行性已被美、澳大利亚等开

展的试验所证实,对其性能的研究和系统设计也在持续开展^[1-2]。射线追踪法(Ray Tracing,RT)作为一种基于几何光学理论的高频近似方法,虽然对衍射和散射的忽略造成了场强计算误差,但估计多径时间上具有明显优势,因而成为一种非常流行的预测无线信道特性的方法^[3]。文献[4]给出了基于幅

* 收稿日期:2014-10-12;修回日期:2015-01-19 Received date:2014-10-12;Revised date:2015-01-19
** 通讯作者:conney3@163.com Corresponding author:conney3@163.com

度和多径延迟时间的信道传输函数,但未考虑海面的反射作用。文献[5]基于 RT,计算了多径延迟和到达信号幅度,幅度计算中用粗糙因子修正表面反射造成的场强衰减,但未考虑电波的传播扩散,且给出了波导强度而不是大气折射率剖面,亦即求解多径时间时未考虑射线在非均匀大气中传播速度的不均匀。文献[6]基于容量有限的 Markov 生灭过程研究大气波导中到达接收站的射线径数,利用 MUSIC 算法对多径到达角进行最佳估计。

综上所述,基于 RT 的蒸发波导通信研究中,场强计算和多径特性估计存在诸多问题有待解决。本文对蒸发波导通信带限信道建模信号的场强计算、多径特性、蒸发波导超视距通信系统设计使用策略、带限冲激响应方法进行了研究,并进行了数值试验。

2 基于 SRT 的蒸发波导信道建模方法

2.1 分段射线追踪法

RT 认为电磁波在非常小的射线管内传播,跟踪每一条射线传播轨迹,有传统积分和泰勒级数近似两种模式。鉴于海洋蒸发波导高度一般不高于 40 m,且本文的研究重点是电波的超视距传播问题,因此选用适于低仰角电波传播计算的泰勒级数近似法。

对大气折指数 n 引入平坦地球近似,将电波沿地表的传播等效为水平传播,则修正大气折射指数为

$$n_{\text{mod}}(z)=n(z)+z/r_e。(1)$$

式中, r_e 为地球半径。修正大气折射率 M 为

$$M=(n_{\text{mod}}-1)\times10^6。(2)$$

设 r_1 、 h_1 、 a_1 和 r_2 、 h_2 、 a_2 分别为射线初始位置和到达位置的距离、高度及仰角, ΔM 为折射率变化量, g 为修正折射率 M 在分层内的线性变化率,RT 的求解公式组为

$$r_2=r_1+(a_2-a_1)/g,(3)$$

$$h_2=h_1+(a_2^2-a_1^2)/(2g),(4)$$

$$a_2=\sqrt{a_1^2+2\Delta M\times10^{-6}}。(5)$$

在某一折射率分层内部,上述射线的轨迹就会有三种情况:单调向上、单调向下或者在层内拐弯(达到最高或最低点)。如果进入别的分层则以进入点作为终点,而对于层内拐弯射线(根据初始点和终点的角度符号相反可以判断),从最高点或最

低点处拆成两段分别计算。这样就统一成单调向上和向下两种情况,这种大气分层条件下分段射线追踪(Subsection Ray Tracing, SRT) 计算方法,既简化了运算,又便于进行传播路径长度和时间的计算。

单调向上和层内达到最高点两种情况如图 1 所示,而单调向下和层内达到最低点的情况具有与图 1 对称的形式。

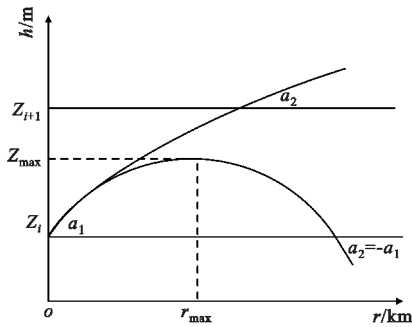


图 1 分段射线追踪
Fig. 1 Subsection ray tracing

从而,根据式(3)~(5)可以由射线初始位置、高度、仰角以及折射率分层情况,求得射线通过的路径。

2.2 蒸发波导模型和电波陷获传播条件

中性大气层结中蒸发波导的大气修正折射率剖面为^[7]

$$M(z)=M(z_0)+0.13[z-d\ln(z/z_0+1)]。(6)$$

式中,表面粗糙参数 z_0 为 1.5×10^{-4} m, d 为蒸发波导高度(单位为 m), $M(z_0)$ 取为 330。若取蒸发波导高度 30 m, 天线高度 25 m, 基于 SRT 的射线轨迹如图 2 所示(只绘出了超视距传播的射线)。

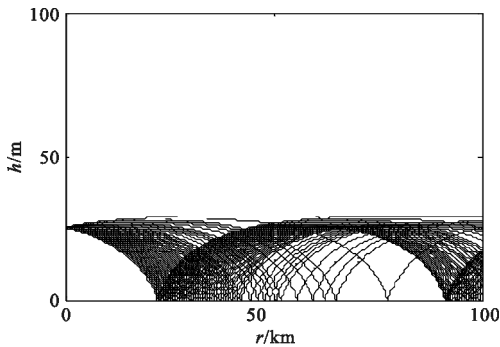


图 2 射线轨迹
Fig. 2 Tracks of rays

对于一定强度/高度的波导,频率大于某一截止频率 f_{min} (即波长小于某一截止波长,单位 Hz) 的电

磁波才能形成陷获传播,如图 3 所示。截止频率与波导高度的近似关系可以表示为^[8]

$$f_{\min}=3.6\times10^{11}\times d^{-1.5}。$$

(7)

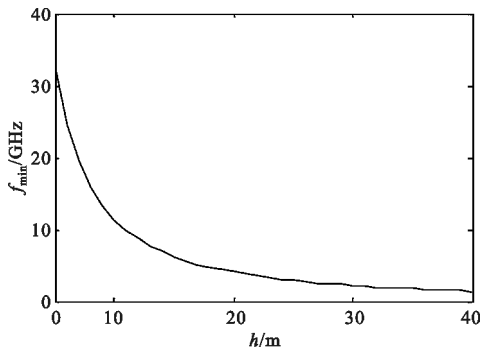


图 3 最低陷获频率
Fig. 3 Minimum trapped frequency

2.3 海洋蒸发波导中电波传播计算

基于前面给出的大气分层条件下 SRT 计算方法,可以方便地计算射线的路径长度。射线弧与水平位移长度之差 ΔS 和射线长度 S 分别为

$$\Delta S=\frac{(10^{-6}M_i-a_2^2/2)(a_2-a_1)+(a_2^3-a_1^3)/3}{g},$$

(8)

$$S=\Delta S+r_2-r_1。$$

(9)

电波在某段路径上的传播时间 Δt 由射线长度 s 及传播速度 v 决定:

$$\Delta t=\int_s\frac{1}{v}ds=\frac{1}{c_0}\int_snds。$$

(10)

式中, c_0 为真空波速。电波强度由初始场、粗糙面反射系数、空间扩散决定,到达强度由接收球法确定。初始场为 $E(\varphi)=f(\varphi)E_0$, 其中 $f(\varphi)$ 为角度 φ 射线对应的天线方向图增益系数,全向天线时为 1。空中传播射线的场强为 $E_2=E_1e^{iks}/s$, 达到地表射线反射前后的场强关系为 $E_2=\Gamma E_1$, 其中 Γ 为菲涅耳反射系数,是入射余角的函数(由射线在表面上的入射余角决定)^[9]。因此,假设射线发生 L 次反射,则射线经过路径 S 后的场强为

$$E_2=f(\varphi)E_0\frac{e^{iks}}{s}\prod_{j=1}^L\Gamma_j。$$

(11)

二维空间上某点的场强为所有到达接收球射线的强度和,接收球半径 R 取为^[3]

$$R\approx S\phi/2。$$

(12)

式中, ϕ 为辐射源出发相邻射线的张角,单位为 rad。多径信号的接收球法,需要清晰地区分各路径,然后针对每一路径族,使用接收球法计算该路径的信号强度,不妨称之为分离多径信号族接收球法。

2.4 蒸发波导带限信道建模方法

由图 1 可知,蒸发波导中,射线经不同路径到达接收位置,是典型的多径信道,其复低通等效冲激响应可以描述为^[4]

$$h(t)=\sum_{i=1}^NE_i\delta(t-\tau_i)\exp(-j\theta_r)F_t(\theta_t)F_r(\theta_r)。$$

(13)

式中, E_i 和 τ_i 分别为第 i 条路径到达信号的幅度和到达时间, F_t/F_r 为收发天线方向图量化因子, θ_t 为射线初始角, θ_r 为到达角。若收发天线均采用通信常用的全向天线时, F_t 和 F_r 均为 1, 则式(13)可简化为

$$h(t)=\sum_{i=1}^NE_i\exp(-j\theta_r)\delta(t-\tau_i)。$$

(14)

蒸发波导中的超视距通信不存在强度占绝对优势的视距路径。为了防止多径时延对接收造成不可逆的影响,信号符号周期 T_s 与最大多径时延 $\tau_{\max}$ 需要满足

$$T_s\geq\tau_{\max}。$$

(15)

为避免多径引起的频率选择性衰落,系统相干带宽 Δf 可取为

$$\Delta f=1/T_s。$$

(16)

$\tau_{\max}$ 决定了可通信道的最大带宽,相当于频域加窗,等效于时域乘以 sinc 函数,因此复低通表示的信道带限冲激响应为

$$h(\tau)=\sum_{i=1}^NE_i\exp(-j\theta_r)\text{sinc}\left(\frac{\tau-\tau_i}{T_s}\right)。$$

(17)

3 信道特性仿真分析与建模

从源点 $\pm 1^\circ$ 夹角内等间隔发射 3000 条射线,蒸发波导高度 30 m,海面风速 5 m/s,发射天线高度 10 m、20 m 和 25 m 时,电波到达 100 km 处的高度与时延分布关系如图 4~6 所示。

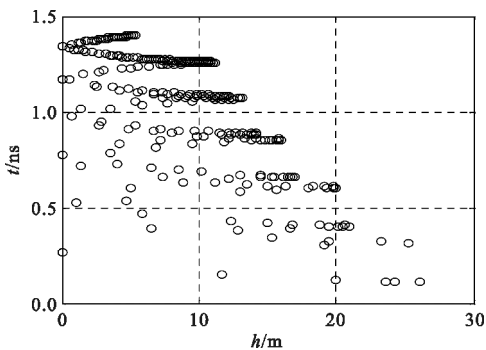


图 4 10 m 发射天线的多径信号时延分布
Fig. 4 Distribution of multipath signal delay with radiating antenna at 10 m

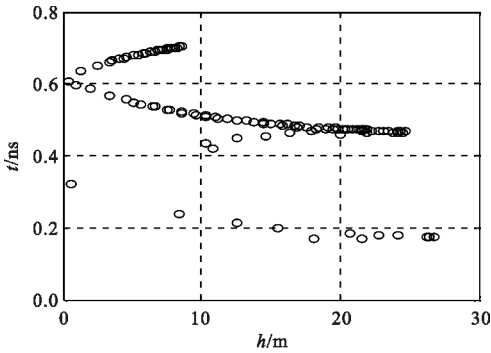


图 5 20 m 发射天线的多径信号时延分布
Fig. 5 Distribution of multipath signal delay with radiating antenna at 20 m

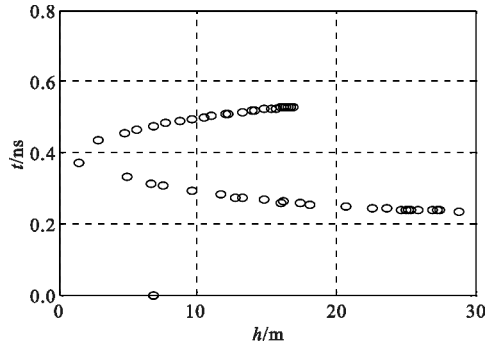


图 6 25 m 发射天线的多径信号时延分布
Fig. 6 Distribution of multipath signal delay with radiating antenna at 25 m

由图 4 ~ 6 可知,波导高度相同,发射天线高度越接近波导高度,多径信号到达接收距离同一接收高度上的径数越少,信号的最大多径时延(即图中接收高度上所有多径信号的时间跨度)越小,反之亦反。天线越低,射线跳数增加,多径情况越复杂,射线族越难分离。因此,分离多径信号族接收球法应用于天线高度极低情况时难度较大,此时可通过 $\tau_{\max}$ 粗略估计系统性能,好在一般舰船用通信天线高度不会低至贴近海面。

发射天线高度 20 m,加倍射线数目,电波到达 100 km 处的高度与时延分布关系如图 7 所示。

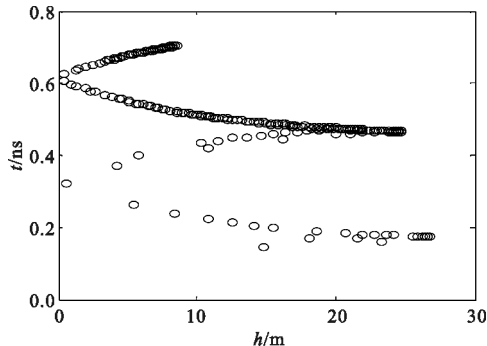


图 7 射线数加倍时多径信号时延分布
Fig. 7 Distribution of multipath signal delay with ray number doubled

由图 7 可知,增加射线数只是增加了到达接收位置射线的密度。因为由原点出发射线的初始角是连续小角度变化的,相邻射线经历的传播路径差异不大,导致到达信号的强度、到达时间、到达角、到达高度连续变化。增大射线条数即减小初始角变化量,表现为到达信号参量的插值,这正说明了式 (12) 接收球法进行场强计算的原理。虽然不用置疑的是 RT 忽略的衍射造成了误差,但对于蒸发波导超视距多径信号,重要的是各径信号的相对强度。为了适应蒸发波导高度随气象条件的变化,保证较高的可通率,必须使得系统能够满足最恶劣条件下的通信。

发射天线高度仍为 20 m,在加倍射线数基础上,再将接收距离加倍为 200 km,电波到达高度与时延分布关系如图 8 所示。

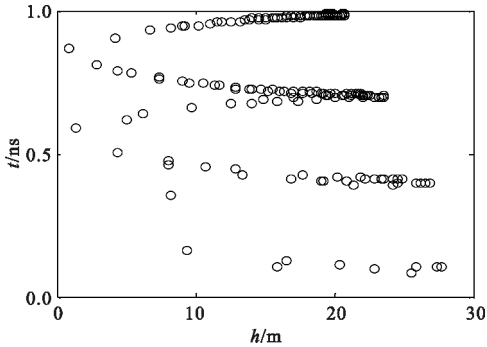


图 8 接收距离加倍时多径信号时延分布
Fig. 8 Distribution of multipath signal delay with receiving distance doubled

由图 5 和图 8 可知,径数和最大多径时延随距离增加而增大,但距离和最大多径时延增量不是直接的倍数关系。对于图 8,根据式 (12) 可知接收球半径约为 0.29 m。则 16 m 和 20 m 接收高度上,多径信号的相对功率 G 延迟剖面如图 9 和图 10 所示。

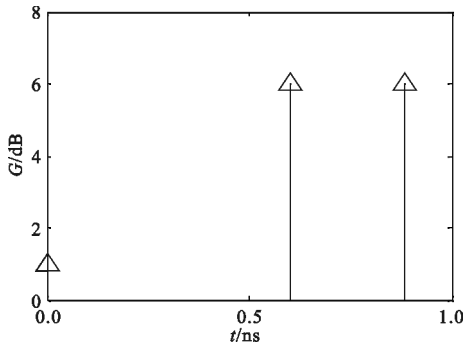


图 9 16 m 高度上相对功率延迟剖面
Fig. 9 Relative power delay profile at 16 m

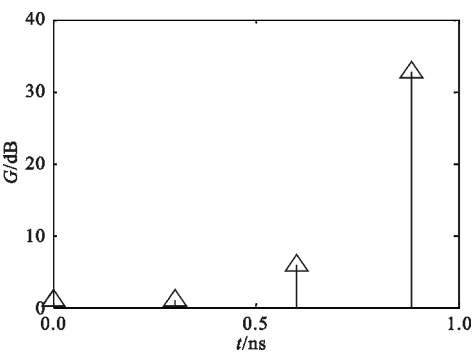


图 10 20 m 高度上相对功率延迟剖面
Fig. 10 Relative power delay profile at 20 m

由图 9 和图 10 可知,在 16 m 和 20 m 高度上,最大多径时延为 0.885 ns,两种情况下主次径相对强度差可达 26.8 dB,因此适当选择接收高度,可以使接收多径信号的相对强度达到最大,更加容易克服多径延迟对信号接收造成的影响,也可以用于指导自适应设计均衡器,实现更好的接收性能。

对于高度 20 m 上进行信号接收,取信号的符号周期 T_s 为临界值,即 0.885 ns,由式 (16) 可知系统相干带宽 Δf 为 1.1 GHz。工程中通常采取冗余设计的办法降低信号处理的复杂度,不妨取符号周期为 4、10 倍的 $\tau_{\max}$ 以作对比,相应的通信带宽分别为 280 MHz 和 110 MHz,则带限冲激响应如图 11 所示。

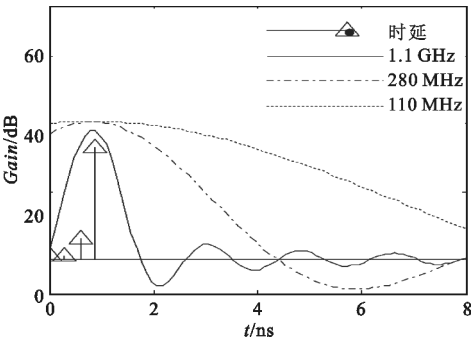


图 11 带限冲激响应
Fig. 11 Bandwidth impulse response

因此,根据蒸发波导高度和预期的通信距离,基于 SRT 和海洋多径信号场强计算方法,仿真可得最大时延和功率延迟剖面,从而可得系统可用带宽和相应的带限冲激响应,根据辐射信号和带限冲激响应,评估系统的误码性能。当然,也可以据此自适应设计均衡器,进一步提高通信系统的误码性能。这对于基于软件无线电技术建立速率自适应数据通信,实现蒸发波导传输信道特性的高效利用具有重

要指导意义。

4 结 论

本文提出了一种基于 RT 进行蒸发波导通信中多径信号场强计算方法,给出了大气分层条件下 SRT 计算方法,综合考虑了电波空间扩散、粗糙海面反射和接收球法,计算电波到达强度,解决了大气波导内部多径信号强度难以计算的问题;研究了蒸发波导内部多径信号的特性;根据电波形成超视距传播条件和多径特性,研究了蒸发波导超视距通信系统设计使用策略;给出了基于多径特性建立带限冲激响应的方法,为蒸发波导通信的链路预算提供了有效的途径,通过控制路径损耗,维持正余量,达到期望的系统差错性能,也可以据此自适应设计均衡器,进一步提高通信系统的误码性能。仿真表明,一整套蒸发波导通信带限信道建模方法切实可行。蒸发波导通信前景诱人,适于波导高发区的岛屿、舰、岸之间移动通信节点的通信,数据速率和可通率较高,性价比优势明显。下一步将进行系统设计并开展试验验证。

参考文献:

[1] 任香凝,李文计.海面蒸发波导微波超视距通信可行性分析[J].信息传输与接入技术,2008,34(2):22-24.
REN Xiangning, LI Wenji. Feasibility analysis on beyond-horizon microwave communication with evaporation duct over the sea [J]. Radio Communications Technology, 2008,34(2):22-24. (in Chinese)
[2] Woods G S. High-capacity, long-range, over ocean microwave link[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2009,34(3):323-330.
[3] 吕英华. 计算电磁学的数值方法[M]. 北京:清华大学出版社,2006:310-315.
LYU Yinghua. Numerical methods in computational electromagnetics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006:310-315. (in Chinese)
[4] 陈绍贺,郑辉,黄兴忠. 大气波导中多径衰落信道参数的定量计算[J]. 电波科学学报,2010,25(4):638-645.
CHEN Shaohe, ZHENG Hui, HUANG Xingzhong. Numerical computation of parameters of multipath fading channel in the atmospheric duct[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010,25(4):638-645. (in Chinese)
[5] 赵楼,杨坤德,杨益新. 海洋蒸发波导信道的多径时延[J]. 探测与控制学报 2010,32(1):39-44.

- ZHAO Lou, YANG Kunde, YANG Yixin. Multi-path effect of Evaporation Duct [J]. Journal of Detection & Control, 2010, 32(1): 39-44. (in Chinese)
- [6] 赵小龙, 黄际英. 大气波导中多径信道的参数研究 [J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2008, 35(2): 314-318.
- ZHAO Xiaolong, HUANG Jiying. Research on multi-path channel parameters in the Marine atmospheric duct [J]. Journal of Xidian University (Natural Science Edition), 2008, 35(2): 314-318. (in Chinese)
- [7] Sirkova I. Brief review on PE method application to propagation channel modeling in sea environment [J]. Central European Journal of Engineering, 2012, 2(1): 19-38.
- [8] Katherine L. A smart climatology of evaporation duct height and surface radar propagation in the INDIAN ocean [D]. Monterey, CA: Naval Postgraduate School, 2007.
- [9] 肖金光, 周新力, 刘晓娣. 弯折谱估计在 PE 模型电波传播中的应用研究 [J]. 电波科学学报, 2014, 29(3): 559-566.
- XIAO Jinguang, ZHOU Xinli, LIU Xiaodi. Application of curved wave spectral estimation in wave propagation with parabolic equation model [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(3): 559-566. (in Chinese)

作者简介:



肖金光(1979—),男,山东日照人,2008年获硕士学位,现为工程师、博士生研究生,主要研究方向为电波传播、海洋大气波导等;

XIAO Jinguang was born in Rizhao, Shandong Province, in 1979. He received the M. S. degree in 2008. He is now an engineer and currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns wave transmission and atmospheric duct on sea.

Email: conney3@163.com

周新力(1964—),男,山东寿光人,2009年获博士学位,现为教授、博士生导师,主要研究方向为现代通信系统与信号处理;

ZHOU Xinli was born in Shouguang, Shandong Province, in 1964. He received the Ph. D. degree in 2009. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns modern communication system and signal processing.

张 烨(1990—),男,山东烟台人,2013年获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为战场电磁环境。

ZHANG Ye was born in Yantai, Shandong Province, in 1990. He received the B. S. degree in 2013. He is now a graduate student. His research concerns battlefield electromagnetic environment.