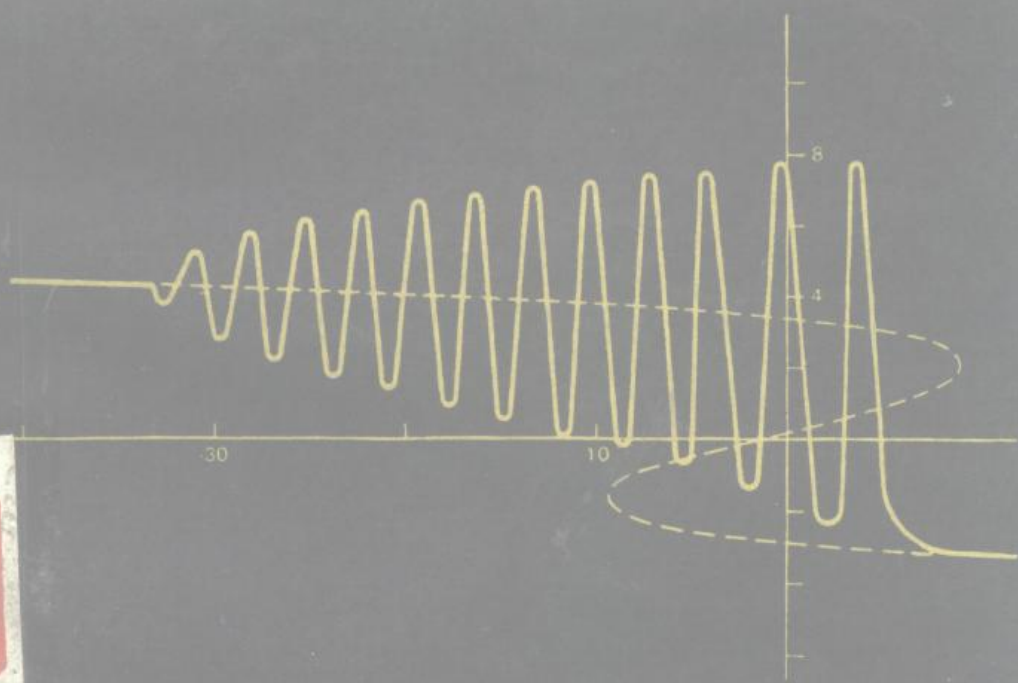


电离层中的 非线性现象

〔苏〕A. V. 古列维奇 著



科学出版社

73.411
155

电离层中的非线性现象

〔苏〕A. V. 古列维奇 著

刘选谋 张训械 译

梁百先 王 桑 校



科学出版社

1986

8610879

DT50/13

内 容 简 介

本书阐述了电离层中的一些非线性现象。书中研究了大功率无线电波引起的电离层变态(电子和离子的加热、等离子体密度的改变),特别着重探讨电离层不稳定性的激发:自聚焦、参量激发和谐振。此外,还详细地讨论了电离层中无线电波的自作用和互作用的非线性效应,诸如电波幅度的衰减和相位的变化、自聚焦和散焦、自调制与交叉调制、谐波产生及电离层检波等。并且以相当的篇幅系统地论述了交变场中有碰撞的等离子体动力学理论。

本书可供电波传播、电离层物理、等离子体物理、空间物理以及无线电通信等方面的研究人员、工程技术人员及大学有关专业师生参考。

A. V. Gurevich

Nonlinear Phenomena in the Ionosphere

Springer-Verlag

电离层中的非线性现象

[苏] A. V. 古列维奇 著

刘选谋 张训械 译

梁百先 王 桑 校

责任编辑 夏墨英

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1986 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1986 年 8 月第一次印刷 印张: 13 1/4

印数: 0001—2,200

字数: 302,000

统一书号: 13031·3239

本社书号: 4097·13—3

定 价: 3.10 元

译 者 的 话

电离层中无线电波的非线性相互作用(交叉调制)是本世纪三十年代由 Telegen 发现的。随后 Bailey, Martin, Fejer 和 Ginzburg 等人就这个问题进行了大量的理论和实验研究。然而,仅在最近,随着大功率无线电波的出现,才使这一研究进入了新的阶段。这种大功率无线电波能够强烈地扰动低电离层并有效地改变上电离层,这就揭示出电离层中各种各样新的物理现象。对这些现象的研究不仅在科学上而且在实用上都有十分重要的科学价值。近年来,美、苏等发达国家对电离层人工变态做了大量的理论和实验工作,并取得不少宝贵的资料。这种人工变态所形成的电离层不均匀体为实现上千公里的散射通信提供了新的前景。尤其最近国外提出建立的卫星太阳能电站 (SPS), 它的强大波束通过电离层将会引起电离层的热逃逸、气晖辐射和各类粒子复杂的化学反应,并在电离层中激发出各种形式的参量不稳定性效应。这对研究电离层的精细结构和高温加热区的动力学过程以及 SPS 计划的实施都有重要意义。同时电离层加热也为研究声重波,哨声等多种高空物理现象开辟了新的途径。《电离层中的非线性现象》一书概括了目前这个课题理论研究方面的一些最新进展。它是电波传播、电离层物理、等离子体物理、空间物理及无线电通信等方面的工作者一本十分难得的宝贵文献。

本书中译本是根据英译本(1978 年第一版)译出,对英译本中某些印刷错误,在翻译时未加注释而作了修正。由于译者水平有限,译文中难免有某些谬误之处,敬请广大读者指正。

译 者

前 言

自本世纪三十年代以来电离层中的非线性效应（无线电波的交叉调制）就为人们所认识。然而，只是在最近，由于无线电发射机的功率和天线的定向特性的飞速提高，才有可能用无线电波强烈地改变电离层特性和人工变态。这就揭示出各种各样新的物理现象。这些现象的研究不仅有科学价值，而且无疑地也有实用意义，并且近年来发展特别迅速。本书就是致力于说明对这个课题的理论研究的现状。当然也特别注意到作者本人为这方面发展所做的工作。

目 录

译者的话

前言

第一章 绪言	1
1.1. 电离层结构的数据.....	1
1.2. 电离层非线性现象的特征.....	6
1.2.1. 非线性机制	6
1.2.2. 非线性现象的定性特征	9
1.2.3. 简单的历史回顾	13
第二章 交变电场中的等离子体动力学	16
2.1. 等离子体中的均匀交变场(初等理论)	16
2.1.1. 电子流——电子电导率和介电常数	17
2.1.2. 电子温度	21
2.1.3. 离子流——电子和离子的加热	32
2.2. 动力方程	38
2.2.1. 电子动力方程的简化	40
2.2.2. 电子碰撞积分的变换	45
2.2.3. 非弹性碰撞	57
2.3. 电子分布函数	65
2.3.1. 强电离等离子体	67
2.3.2. 弱电离等离子体	79
2.3.3. 任意的电离度——关于初等理论	94
2.4. 离子分布函数	99
2.4.1. 动力方程的简化	99
2.4.2. 分布函数	100

2.4.3 离子温度、离子流	104
2.5. 无线电波对电离层的作用	107
2.5.1. 电离层中的电离平衡	107
2.5.2. 电子碰撞和离子碰撞的有效频率——损失能量 部分数	113
2.5.3. 电离层中电子和离子的温度	119
2.5.4. 交变电场中电离层的加热	123
2.5.5. 电子和离子浓度的扰动	126
2.5.6. 电离层的人工电离——中性气体的加热	128
第三章 平面无线电波的自作用	141
3.1. 初始方程的简化	141
3.1.1. 非线性波动方程	141
3.1.2. 平面波的非线性几何光学	143
3.2. 非线性对电波振幅和相位的影响	145
3.2.1. 弱波的自作用	145
3.2.2. 强波的自作用	149
3.2.3. 人工电离情况下电波的自作用	161
3.3. 电波调制的改变	165
3.3.1. 弱波	165
3.3.2. 强波振幅调制的变化	168
3.3.3. 相位调制	176
3.3.4. 脉冲波形的非线性失真	177
3.4. 谐波的产生和非线性检波	180
3.4.1. 三倍频	180
3.4.2. 非线性检波	183
3.5. 低电离层中无线电波的自作用	184
第四章 平面无线电波的互作用	196
4.1. 交叉调制	196
4.1.1. 弱波	196
4.1.2. 强干扰波	204

4.1.3. 电子磁旋频率附近的谐振效应	209
4.2. 未调制波的互作用	212
4.2.1. 短脉冲的相互作用	212
4.2.2. 在受扰等离子体区域内传播的电波吸收的变 化	216
4.2.3. 具有组合频率电波的产生	218
4.3. 低电离层中无线电波的相互作用	221
4.3.1. 交叉调制	221
4.3.2. Fejer's 方法	223
4.3.3. 强无线电波互作用中的非稳定过程	226
第五章 非均匀等离子体中无线电波的自作用和互作 用	229
5.1. 等离子体中的非均匀电场	229
5.1.1. 基本方程	229
5.1.2. 等离子体中密度和温度的分布	239
5.2. 非均匀等离子体动力学	245
5.2.1. 动力系数, 初等理论	245
5.2.2. 动力论	249
5.2.3. 完全电离的等离子体	261
5.3. 用无线电波使电离层 F 区的变态	262
5.3.1. 电子温度和等离子体浓度的变态	263
5.3.2. 无线电波的反射区域	274
5.3.3. 扰动的成长和弛豫	282
5.4. 无线电波束的聚焦和散焦	288
5.4.1. 非线性几何光学	288
5.4.2. 窄波束的散焦	295
5.4.3. 互散焦	306
5.4.4. 低电离层的热聚焦	311
第六章 电离层不稳定性的激发	315
6.1. 自聚焦不稳定性	316

6.1.1. 均匀等离子体的空间不稳定性	316
6.1.2. 电波反射区域的不稳定性	325
6.2. 谐振吸收和谐振不稳定性	334
6.2.1. 非均匀等离子体中的 Langmuir 振荡	334
6.2.2. 等离子体波的激发	341
6.2.3. 谐振不稳定性	347
6.2.4. 寻常波的吸收	352
6.3. 参量不稳定性	358
6.3.1. 交变场中等离子体的 Langmuir 振荡	359
6.3.2. Langmuir 振荡的参量激发	368
6.3.3. 电离层中的参量不稳定性	374
6.3.4. 耗散参量不稳定性	379
参考文献	393
主要符号	403
主题索引	408

第一章 绪 言

1.1. 电离层结构的数据

电离层是地球高层大气的一部分, 高度从 60 公里大约延伸到 1000 公里。在这个区域内, 大气是部分电离的气体或等离子体。电离层等离子体中发生的一些过程与太阳的波和微粒辐射、磁层事件、地球磁场的变化以及同高层大气的运动等等密切相关。这就是电离层为什么随时间(一天的时间、一年的季节、太阳活动的十一年周期)和地理纬度如此强烈变化的原因。

电离层是未电离的高层大气和磁层完全电离的氢等离子体之间的过渡层。因此, 电离层的结构和特性随高度而迅速变化。

电离层从 $z = 50$ 到 80 公里的较低区域通常称为 D 层。该层白天是电离的。从 80 到 130 公里的区域称为 E 层。150 公里以上的区域称为 F 层。有时还将直到大约 250 公里的 F_1 层和 250 公里以上的 F_2 层再加以区分。

表 1 和表 2 (Harris 等 1962; Al'pert, 1967) 列出了中纬和平均太阳活动期间的电离层模式。本书的一些估算和数值计算中将会用到这个模式。

从表 1 可以看出, 高层大气密度随高度迅速减小。直到 100—110 公里, 分子成分几乎不变; 在 100—120 公里范围内氧分子发生离解, $O_2 \rightarrow O + O$; 在 300 公里附近, 氮分子离解; 在 500—600 公里处, 氢的相对浓度迅速增加; 在 z 大约为 1000 公里处, 氢的相对浓度同样也增加很快; 在 z 约

表 1. 电离层的分子成分

z (公里)	日间 (中午 12:00) 浓度 N_m (厘米 ⁻³)						T (绝对温度)
	N ₂	O ₂	He	O	H	总的 N_m	
60	5.5×10^{13}	1.5×10^{13}				7.0×10^{13}	270
70	1.6×10^{13}	4.2×10^{14}				2.0×10^{13}	200
80	2.3×10^{14}	6.2×10^{13}				2.9×10^{14}	180
90	3.1×10^{13}	8.2×10^{12}				3.9×10^{13}	190
100	7.7×10^{12}	1.9×10^{12}	5.7×10^7	2.0×10^{11}	6.2×10^4	9.6×10^{12}	210
110	1.4×10^{12}	3.5×10^{11}	3.8×10^7	1.4×10^{11}	5.3×10^4	1.9×10^{12}	270
120	5.8×10^{11}	1.2×10^{11}	2.5×10^7	7.6×10^{10}	4.3×10^4	7.8×10^{11}	360
130	2.0×10^{11}	3.8×10^{10}	1.7×10^7	3.7×10^{10}	3.2×10^4	2.8×10^{11}	460
150	4.8×10^{10}	7.2×10^9	1.0×10^7	1.35×10^{10}	2.1×10^4	6.9×10^{10}	670
200	4.8×10^9	5.9×10^8	4.9×10^6	3.0×10^9	1.3×10^4	8.4×10^9	1070
250	1.1×10^9	1.2×10^8	3.4×10^6	1.3×10^9	1.0×10^4	2.5×10^9	1250
300	3.2×10^8	2.7×10^7	2.7×10^6	5.9×10^8	9.3×10^3	9.3×10^8	1330
400	3.5×10^7	2.2×10^6	1.9×10^6	1.6×10^8	8.3×10^3	2.0×10^8	1390
500	4.4×10^6	2.1×10^5	1.4×10^6	5.0×10^7	7.6×10^3	5.6×10^7	1400
600	5.9×10^5	2.1×10^4	1.0×10^6	1.6×10^7	7.1×10^3	1.7×10^7	1400
700	8.5×10^4	2.3×10^3	8.0×10^5	5.2×10^6	6.6×10^3	6.0×10^6	1400
800	1.3×10^4	2.7×10^2	6.1×10^5	1.8×10^6	6.2×10^3	2.4×10^6	1400
900	2.1×10^3	3.3×10^1	4.7×10^5	6.2×10^5	5.8×10^3	1.1×10^6	1400
1000	3.5×10^2	4.3	3.7×10^5	2.2×10^5	5.4×10^3	6.0×10^5	1400

(续表)

z (公里)	夜间 (午夜) 浓度 N_m (厘米 ⁻³)						T (绝对温度)
	N ₂	O ₂	He	O	H	总的 N_m	
60	5.5×10 ¹⁵	1.5×10 ¹⁵				7.0×10 ¹⁵	270
70	1.6×10 ¹⁵	4.2×10 ¹⁴				2.0×10 ¹⁵	200
80	2.3×10 ¹⁴	6.2×10 ¹³				2.9×10 ¹⁴	180
90	3.1×10 ¹⁵	8.2×10 ¹²				3.9×10 ¹⁵	190
100	7.7×10 ¹²	1.9×10 ¹²	5.7×10 ⁷	2.2×10 ¹¹	6.2×10 ⁴	9.6×10 ¹²	210
110	1.4×10 ¹²	3.5×10 ¹¹	3.8×10 ⁷	1.4×10 ¹¹	5.3×10 ⁴	1.9×10 ¹²	270
120	5.8×10 ¹¹	1.2×10 ¹¹	2.5×10 ⁷	7.6×10 ¹⁰	4.3×10 ⁴	7.8×10 ¹¹	360
130	2.0×10 ¹¹	3.7×10 ¹⁰	1.7×10 ⁷	3.7×10 ¹⁰	3.2×10 ⁴	2.7×10 ¹¹	470
150	4.8×10 ¹⁰	7.0×10 ⁹	1.0×10 ⁷	1.4×10 ¹⁰	2.2×10 ⁴	6.9×10 ¹⁰	650
200	4.7×10 ⁹	5.6×10 ⁸	5.9×10 ⁶	3.2×10 ⁹	1.6×10 ⁴	8.4×10 ⁹	850
250	7.7×10 ⁹	7.1×10 ⁷	4.3×10 ⁶	1.2×10 ⁹	1.4×10 ⁴	2.0×10 ⁹	910
300	1.4×10 ⁸	1.0×10 ⁷	3.3×10 ⁶	4.4×10 ⁸	1.3×10 ⁴	5.9×10 ⁸	930
400	6.0×10 ⁶	2.8×10 ⁵	2.1×10 ⁶	7.0×10 ⁷	1.1×10 ⁴	7.8×10 ⁷	940
500	2.8×10 ⁵	8.6×10 ³	1.3×10 ⁶	1.2×10 ⁷	1.0×10 ⁴	1.3×10 ⁷	950
600	1.5×10 ⁴	2.9×10 ²	8.7×10 ⁵	2.3×10 ⁶	9.0×10 ³	3.2×10 ⁶	950
700	8.4×10 ²	1.1×10 ¹	5.8×10 ⁵	4.4×10 ⁵	8.1×10 ³	1.0×10 ⁶	950
800	5.1×10	4.6×10 ⁻¹	3.9×10 ⁵	8.9×10 ⁴	7.3×10 ³	4.8×10 ⁵	950
900	3.4	2.1×10 ⁻²	2.6×10 ⁵	1.9×10 ⁴	6.7×10 ³	2.8×10 ⁵	950
1000	2.4×10 ⁻¹	1.0×10 ⁻³	1.8×10 ⁵	4.2×10 ³	6.1×10 ³	1.9×10 ⁵	950

表 2. 电离层的结

s (公里)	日 间					夜		
	N (厘米 ⁻³)	T_e (绝对 温度)	T_i (绝对 温度)	ω_0 (秒 ⁻¹)	Ω_0 (秒 ⁻¹)	N (厘米 ⁻³)	T_e (绝对 温度)	T_i (绝对 温度)
60	80	270	270	5×10^5	2.1×10^5	—	—	—
70	2×10^5	200	200	8×10^5	3.3×10^5	—	—	—
80	10^5	180	180	1.8×10^6	7.5×10^5	10	180	180
90	8×10^5	200	190	5×10^6	2.1×10^6	60	190	190
100	8×10^6	240	210	1.6×10^7	6.7×10^6	1.2×10^5	210	210
110	1.2×10^5	320	270	1.9×10^7	8×10^6	1.8×10^5	270	270
120	1.3×10^5	400	360	2×10^7	8.4×10^6	2.1×10^5	360	360
130	1.5×10^5	500	460	2.2×10^7	9.2×10^6	2.2×10^5	480	470
150	3×10^5	800	670	3.1×10^7	1.35×10^7	2.4×10^5	670	650
200	5×10^5	1300	1100	4×10^7	2.2×10^7	3×10^5	900	850
250	1.0×10^6	1700	1300	5.6×10^7	3.3×10^7	10^6	1000	910
300	1.6×10^6	2000	1400	7.1×10^7	4.2×10^7	10^6	1200	930
400	1.5×10^6	2400	1450	6.9×10^7	4.1×10^7	3×10^5	1400	950
500	9×10^5	2600	1600	5.4×10^7	3.2×10^7	2×10^5	1500	1000
600	4×10^5	2700	2100	3.6×10^7	2.2×10^7	1.3×10^5	1600	1020
700	2×10^5	2800	2200	2.5×10^7	1.6×10^7	8×10^4	1700	1100
800	10^5	2870	2300	1.8×10^7	1.25×10^7	5×10^4	1800	1200
900	7×10^4	2940	2400	1.5×10^7	1.2×10^7	3×10^4	1900	1300
1000	5×10^4	3000	2500	1.3×10^7	1.2×10^7	2×10^4	2000	1400

符号: N ——准中性等离子体中, 离子和电子的浓度,
 $\omega_0 = (4\pi e^2 N/m)^{1/2}$, $\Omega_0 = (4\pi e^2 N/M)^{1/2}$ ——电子和离

构 (电子与离子)

间		相对离子浓度 $n = N_i/N$						
ω_0 (秒 ⁻¹)	Ω_0 (秒 ⁻¹)	NO ⁺	O ₂ ⁺	O ⁺	He ⁺	H ⁺	N ⁺	N ₂ ⁺
—	—	0.8	0.2	—	—	—	—	—
—	—	0.8	0.2	—	—	—	—	—
1.8×10^3	7.5×10^2	0.7	0.3	—	—	—	—	—
4.4×10^3	1.8×10^3	0.65	0.35	—	—	—	—	—
1.9×10^4	8×10^3	0.62	0.38	—	—	—	—	—
2.4×10^4	10^4	0.55	0.45	—	—	—	—	—
2.6×10^4	1.1×10^4	0.39	0.60	0.01	—	—	—	—
2.7×10^4	1.1×10^4	0.42	0.55	0.02	—	—	—	0.01
2.8×10^4	1.2×10^4	0.45	0.41	0.13	—	—	—	0.01
3.1×10^4	1.7×10^4	0.045	0.045	0.90	—	—	5×10^{-3}	5×10^{-3}
5.6×10^4	3.3×10^4	6×10^{-3}	5×10^{-3}	0.98	—	—	6×10^{-3}	3×10^{-3}
1.8×10^5	1.1×10^5	—	—	0.99	—	—	0.01	—
3.1×10^5	1.8×10^5	—	—	0.97	5×10^{-3}	0.01	0.02	—
2.5×10^5	1.5×10^5	—	—	0.90	0.015	0.03	0.06	—
2×10^5	1.2×10^5	—	—	0.84	0.02	0.06	0.08	—
1.6×10^5	1.0×10^5	—	—	0.75	0.04	0.11	0.10	—
1.3×10^5	9×10^4	—	—	0.61	0.06	0.21	0.12	—
9.8×10^4	7.7×10^4	—	—	0.41	0.09	0.40	0.10	—
8×10^4	7.3×10^4	—	—	0.28	0.14	0.51	0.07	—

N_i ——离子浓度; T_e ——电子温度, T_i ——离子温度,
子的 Langmuir 频率 (m 和 M ——电子和离子质量)。

为 1500 公里处,氢原子 H 成为主要成分了。

电子和离子密度随高度增加直到 300—400 公里 (表 2); 随后在 $z > 400$ 公里高度以上,密度将非常缓慢地减小。在较低高度上,等离子体的电离度是很低的 ($z = 100—300$ 公里处, $N/N_m = 10^{-8}—10^{-4}$), 随着 z 的增加而迅速增加, 在 $z \geq 1000$ 公里处达 10%。在更高的高度上,等离子体几乎完全电离。电子和离子温度随着高度非常平稳地增加,但在一天内有着剧烈的变化。在高度为 300—700 公里处,电子温度能够为离子温度的 1.5—2 倍。

直到纬度 $\theta = 55—60^\circ$, 电离层的离子结构 (表 2) 随着纬度 θ 的变化不大。在较高纬度处,电离层中总的离子密度随高度迅速减小。在较大高度上,氧离子 O^+ 的相对浓度很快增加。由于电离层特性的可变性,表征电磁波传播的一些主要参量也随着高度和一天的时间等而剧烈地变化。

电离层特性和结构的详细资料及其研究中所使用的方法,可在一些专著 (Whitten 和 Poppoff, 1965; Bauer, 1973; Al'pert, 1974) 和大量期刊中找到。

1.2. 电离层非线性现象的特征

1.2.1. 非线性机制

等离子体的主要特征之一是,甚至在相当微弱或容易获得的电场情况下,它的非线性效应都能表现出来。

按照等离子体中的情况,可分成两种类型的非线性效应。第一种是同电子在波的电场中的碰撞加热有关。由于电子的平均自由程很大,并且在接连两次碰撞过程中能够从电场获得可观能量,因此这种加热是很容易产生的。另外,因为电子质量与那些重粒子的质量之比很小,这就阻止了由于碰撞引起的从电子向分子、原子、离子的能量传递。结果即使在相当

弱的电场中,等离子体中的电子也很快地加热,于是使等离子体的介电常数和电导率与场强有关。换句话说,电流不再正比于电场 E 了。因此,等离子体中的电动力学过程,特别是电波传播变为非线性的(迭加原理受到破坏等等)。这种类型的非线性称作热非线性。它与电子的碰撞有关,并且当受到电场扰动的等离子体区域的特征尺度远大于电子的平均自由程时,这种效应起着主要作用。

第二种类型的非线性与碰撞无关。同上面相反,当受到电场扰动的等离子体区域的尺度远小于平均自由程时,这类非线性在无碰撞等离子体中起主要作用。可以指出,在无碰撞等离子体中,有几种起作用的非线性机制。其中最重要的一种机制是由下面的事实引起的:由无线电波的非均匀交变电场对电子施加压力(Caponov 和 Miller, 1958; Pitaevskii, 1960),因而压缩了等离子体。由于这个缘故,电子密度以及与此有关的等离子体的介电常数变得依赖于电场的振幅,由此引起了电动力学过程的非线性。常常把这种非线性称为伸缩非线性机制。

让我们来估计一下电离层中各种非线性机制的相对作用。热非线性导致复介电常数的一个非线性扰动(见 2.1 节):

$$\Delta \epsilon_T \sim (E_0/E_p)^2, \quad (1.1)$$

这里 E_0 是电波电场的振幅, E_p 是由

$$E_p = \left[3T \frac{m}{e^2} \delta_0 (\omega^2 + \nu_{\infty}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \\ = 4.2 \times 10^{-5} [\delta_0 T (\omega^2 + \nu_{\infty}^2)]^{\frac{1}{2}} \text{ 毫伏/米} \quad (1.2)$$

给出的特征等离子体场。式中 T 是等离子体的温度(度), ω 是场的圆频率, ν_{∞} 是电子同分子和离子碰撞的有效频率, δ_0 是电子在一次碰撞中能量损失的平均份额。电场的数值用毫伏/米表示 (T 是绝对温度, ω 是 1/秒)。

电离层中不同频率和不同功率无线电波的 $\Delta\epsilon_T$ 值列于表 3。这里 W_0 是等效偶极子的有效辐射功率*。我们知道，在实际台站的功率情况下，比率 $(E_0/E_p)^2 \sim \Delta\epsilon_T$ 可达 1 的量级，甚至还大得多。这种强场的作用大大地改变了等离子体的特性。因此，非线性决定着电波传播的整个特征。电子加热有反常特性的谐振区域，热非线性强烈地增加，这也是很重要的。

伸缩非线性引起介电常数的扰动 (Pitaevskii, 1960) 是

$$\Delta\epsilon_s \sim e^2 E_0^2 / 8mT\omega^2. \quad (1.3)$$

表 3. 电离层扰动的比较数值：热非线性 ($\Delta\epsilon_T$) 和 伸缩 ($\Delta\epsilon_s$)

ω (秒 ⁻¹)		$z = 100$ (公里)			$z = 300$ (公里)		
		10^4	10^7	10^9	3×10^7	10^8	10^9
$W_0 = 10^2$ (千瓦)	$\Delta\epsilon_T$	1.1	1.2×10^{-2}	1.2×10^{-4}	4.1×10^{-4}	3.8×10^{-5}	3.8×10^{-7}
	$\Delta\epsilon_s$	8×10^{-4}	8×10^{-6}	8×10^{-8}	1.5×10^{-8}	1.4×10^{-9}	1.4×10^{-11}
$W_0 = 10^4$ (千瓦)	$\Delta\epsilon_T$	110	1.2	1.2×10^{-2}	4.1×10^{-2}	3.8×10^{-3}	3.8×10^{-5}
	$\Delta\epsilon_s$	8.0×10^{-2}	8×10^{-4}	8×10^{-6}	1.5×10^{-6}	1.4×10^{-7}	1.4×10^{-9}
$W_0 = 10^6$ (千瓦)	$\Delta\epsilon_T$	1.1×10^4	120	1.2	4.1	0.38	3.8×10^{-3}
	$\Delta\epsilon_s$	8	8×10^{-2}	8×10^{-4}	1.5×10^{-4}	1.4×10^{-5}	1.4×10^{-7}

对电离层中无线电波而言，这个量的一些数值列于表 3。

由表看出，在电离层中，由于强电磁波场中电子的加热引起的热非线性起主要作用，因此本书主要探讨这一问题。但是必须指出，有时在一定条件下，伸缩非线性也是重要的；这

* 往后辐射功率的估算是假设发射台位于地面。高度 z 处的电场用公式 $E_0 = 300\sqrt{W_0/z}$ 计算。这里 $W_0 = PG$ 是由等效偶极子辐射的功 (千瓦) (P 是发射台的实际功率, G 是天线增益), z 是距离 (公里), 场 E_0 由毫伏/米表示。