دانشگاه تهران
دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای
دانشکدگان علوم و فناوری‌های
میان‌رشته‌ای
گروه علوم داده

بازسازی کور مشترک کدهای توربو با بازیابی همزمان کدگذارهای RSC و درهم‌ریزهای داخلی و خارجی

رساله برای دریافت درجهٔ دکتری در رشتهٔ مهندسی شبکه‌های کامپیوتری
گرایش ؟؟

شهریار توقی

استاد راهنما

دکتر مهدی تیموری

شهریور ۱۴۰۵

بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تهران
دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای
دانشکدگان علوم و فناوری‌های
میان‌رشته‌ای
گروه علوم داده

بازسازی کور مشترک کدهای توربو با بازیابی همزمان کدگذارهای RSC و درهم‌ریزهای داخلی و خارجی

رساله برای دریافت درجهٔ دکتری در رشتهٔ مهندسی شبکه‌های کامپیوتری
گرایش ؟؟

شهریار توقی

استاد راهنما

دکتر مهدی تیموری

استاد مشاور

دکتر کاکائی

شهریور ۱۴۰۵

چکیده

شناسایی و بازسازی کور ساختار کدهای کانال، به‌ویژه کدهای توربو، در مخابرات غیرهمکارانه یک مسئلهٔ کلیدی است. در این رساله، مسئلهٔ بازسازی مشترک پلی‌نوم‌های کدگذارهای RSC، درهم‌ریز داخلی و درهم‌ریز خارجی با درنظرگرفتن خاتمهٔ ترلیس و نویز صورت‌بندی و حل می‌شود. رویکرد پیشنهادی بر قیود جبری کدگذار، آزمون آماری قیود تحت نویز و جست‌وجوی درختی مقید استوار است تا پارامترهای مجهول از روی مشاهدات سخت (و در تعمیم‌ها، نرم) بازیابی شوند. نوآوری‌های اصلی شامل صورت‌بندی جامع مسئله، بازسازی همزمان مؤلفه‌های کد توربو، مدل‌سازی ابهام ساختاری و تحلیل رابطهٔ نویز با پیچیدگی محاسباتی است. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل‌های نظری نشان می‌دهند روش پیشنهادی در شرایط نویزی نیز قادر به بازسازی ساختار مجاز کد است؛ جزئیات عددی پس از تکمیل ارزیابی‌ها در چکیده نهایی خواهد آمد.

۰-۰-۰-۰-۱ **کلمات کلیدی** بازسازی کور، کد توربو، کدگذار RSC، درهم‌ریز، مخابرات غیرهمکارانه، شناسایی کور کد کانال

چکیده گرافیکی

جای تصویر چکیده گرافیکی: معماری کلی رساله و چارچوب روش پیشنهادی بازسازی کور مشترک.

تقدیم به:

قدردانی

سپاس خداوندگار حکیم را که با لطف بی‌کران خود، آدمی را به زیور عقل آراست.

در آغاز وظیفهٔ خود می‌دانم از زحمات بی‌دریغ استاد(ان) راهنما و مشاور صمیمانه تشکر و قدردانی کنم که در طول انجام این رساله همواره راهنما و مشوق اینجانب بودند.

از خانواده و دوستانی که در این مسیر همراهی کردند نیز سپاسگزارم.

شهریار توقی

شهریور ۱۴۰۵

دانشگاه تهران
دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای
دانشکدگان علوم و فناوری‌های
میان‌رشته‌ای

گواهی دفاع از رسالهٔ دکتری

هیأت داوران رسالهٔ دکتری آقای / خانم شهریار توقی به شمارهٔ دانشجویی ۰۰۰۰۰۰۰۰۰ در رشتهٔ مهندسی شبکه‌های کامپیوتری – گرایش ؟؟ را در تاریخ ..... با عنوان «بازسازی کور مشترک کدهای توربو با بازیابی همزمان کدگذارهای RSC و درهم‌ریزهای داخلی و خارجی»

	به عدد	به حروف
با نمرهٔ نهایی		

و درجهٔ [ ] ارزیابی کرد.

ردیف	مشخصات هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبهٔ دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضا
۱	استاد راهنما	دکتر مهدی تیموری	دانشیار	دانشگاه تهران	
۲	استاد مشاور	دکتر کاکائی	استادیار	دانشگاه تهران	
۳	استاد داور داخلی	دکتر داور داخلی	دانشیار	دانشگاه تهران	
۴	استاد مدعو	دکتر داور خارجی	دانشیار	دانشگاه داور خارجی	
۵	نمایندهٔ تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر نماینده	دانشیار	دانشگاه تهران	

نام و نام خانوادگی معاون تحصیلات تکمیلی و پژوهشی دانشکده / گروه:

تاریخ و امضا:

نام و نام خانوادگی معاون آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده:

تاریخ و امضا:

تعهدنامهٔ اصالت اثر

باسمه تعالی

اینجانب شهریار توقی تأیید می‌کنم که مطالب مندرج در این رساله حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آن‌ها استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این رساله قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتری ارائه نشده است.

نام و نام خانوادگی دانشجو: شهریار توقی

تاریخ و امضای دانشجو:

نتیجه سامانه تشابه‌یابی (همانندجویی)

جای تصویر نتیجه سامانه تشابه‌یابی (همانندجویی).

سوگندنامه دانش‌آموختگان دکتری دانشگاه تهران

بسم‌الله الرحمن الرحیم

سپاس یزدان پاک را که مرا مشمول الطاف خویش نمود که با طی مراحل تحصیل به اخذ درجه دکتری نائل شوم؛ به شکرانه این نعمت بزرگ الهی که با امکانات این مرز و بوم فراهم و نزد اینجانب به امانت گذاشته شده است، در پیشگاه ملت ایران به کتاب آسمانی خود، قرآن کریم، سوگند یاد می‌کنم که:

- در سراسر زندگی حرفه‌ای، به نحو احسن در راه اعتلای کشور ایران و جامعه بشری قدم برداشته و در این راه از هیچ کوششی دریغ نکنم.
- در تمام فعالیت‌های تخصصی، رضای خدا را همراه با صداقت علمی و اجتماعی مدنظر داشته و از موقعیت‌های به‌دست‌آمده در جهت رفع مشکلات مردم استفاده کنم و در همه امور، منافع کشور را بر منافع فردی مقدم بدارم.
- همواره علم و دانش خود را به‌روز نگاه داشته و در ادای وظایف و تعهدات حرفه‌ای در حد توان سعی و تلاش خود را به کار گیرم.

و اینک از خداوند متعال توفیق بندگی و پای‌بندی به مفاد این سوگندنامه را خواستارم و از او می‌خواهم که مرا در ادامه و پیمودن مسیر و فتح قله‌های رفیع علم و دانش و ایفای رسالت علمی و انسانی خویش موفق بدارد.

و ایمان دارم که:

«ان الله یعلم غیب السموات و الارض و الله بصیر بما تعملون (سوره حجرات، آیه ۱۸)»

نام و نام خانوادگی و امضای دانشجو: شهریار توقی

تأمین اعتبار رساله

این رساله تنها با حمایت مالی دانشگاه تهران انجام شده است و حامی مالی دیگری نداشته است.

کلیهٔ حقوق مادی و معنوی این اثر
متعلّق به دانشگاه تهران است.

فهرست مطالب

فهرست شکل‌ها خ

فهرست جدول‌ها د

فهرست اختصارات ذ

فصل ۱: کلیات تحقیق ۱

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ بیان مسئله ۱

۱-۳ اهمیت و ضرورت تحقیق ۲

۱-۴ کاربردهای شناسایی کور کدهای کانال ۲

۱-۵ چالش‌های شناسایی کور کدهای توربو ۲

۱-۶ اهداف تحقیق ۳

۱-۷ پرسش‌های اصلی تحقیق ۳

۱-۸ فرضیات و محدودیت‌های تحقیق ۳

۱-۹ نوآوری‌های تحقیق ۳

۱-۱۰ روش تحقیق ۴

۱-۱۱ ساختار رساله ۴

فصل ۲: مبانی نظری و پیشینه پژوهش ۵

۲-۱ مقدمه ۵

۲-۲ کدهای تصحیح خطا ۵
۲-۲-۱ مفهوم کدگذاری کانال ۵
۲-۳ کدهای توربو ۶
۲-۳-۱ تاریخچه و تکامل کدهای توربو ۶
۲-۳-۲ ساختار Code Turbo ۶
۲-۳-۳ کدگذارهای RSC ۶
۲-۳-۴ پلی‌نوم‌های مولد ۶
۲-۳-۵ حافظه و حالت‌های کدگذار ۷
۲-۳-۶ ترلیس و گذارهای حالت ۷
۲-۳-۷ خاتمه ترلیس ۷
۲-۳-۸ درهم‌ریز داخلی ۷
۲-۳-۹ درهم‌ریز خارجی ۷
۲-۳-۱۰ پانچینگ و نرخ کد ۷
۲-۳-۱۱ ساختار سریالی خروجی کد توربو ۷
۲-۴ مدل کانال و مدل مشاهده ۸
۲-۴-۱ کانال AWGN ۸
۲-۴-۲ BPSK ۸
۲-۴-۳ آشکارسازی سخت ۸
۲-۴-۴ آشکارسازی نرم ۸
۲-۴-۵ مدل کانال معادل BSC ۸
۲-۵ مفهوم شناسایی کور ۸
۲-۶ شناسایی کور کدهای کانولوشنی ۹
۲-۷ شناسایی کور کدهای توربو ۹
۲-۷-۱ شناسایی پارامترهای کدگذار ۹
۲-۷-۲ بازیابی پلی‌نوم‌ها ۹
۲-۷-۳ بازیابی درهم‌ریز ۹

۲-۷-۴ تشخیص نرخ کد ۹
۲-۷-۵ تشخیص طول فریم ۹
۲-۷-۶ تشخیص حافظه ۹
۲-۷-۷ تشخیص پانچینگ ۹
۲-۷-۸ همزمان‌سازی و تعیین مرز فریم ۹
۲-۸ روش‌های موجود در ادبیات ۱۰
۲-۹ شکاف پژوهشی ۱۰

فصل ۳: مدل سیستم و صورت‌بندی ریاضی مسئله ۱۱
۳-۱ مقدمه ۱۱
۳-۲ ساختار عمومی کد توربو ۱۱
۳-۳ مدل کدگذار RSC ۱۲
۳-۳-۱ مدل چندجمله‌ای ۱۲
۳-۳-۲ تابع انتقال ۱۲
۳-۳-۳ نمایش باینری و اکتال ۱۲
۳-۳-۴ معادلات بازگشتی ۱۲
۳-۴ مدل درهم‌ریز داخلی ۱۲
۳-۵ مدل درهم‌ریز خارجی ۱۲
۳-۶ مدل پانچینگ ۱۲
۳-۷ مدل خاتمه ترلیس ۱۳
۳-۸ مدل کانال ۱۳
۳-۸-۱ AWGN ۱۳
۳-۸-۲ BPSK ۱۳
۳-۸-۳ معادل BSC ۱۳
۳-۹ مدل دریافت ۱۳
۳-۱۰ تعریف پارامترهای مجهول ۱۴

۳-۱۱ تعریف مسئله بازسازی کور ۱۴

فصل ۴: روش پیشنهادی بازسازی کور مشترک ۱۵

۴-۱ مقدمه ۱۵

۴-۲ ایده اصلی روش پیشنهادی ۱۵

۴-۳ تعریف فضای جست‌وجو ۱۶

۴-۳-۱ فضای پلی‌نوم‌ها ۱۶

۴-۳-۲ فضای حافظه ۱۶

۴-۳-۳ فضای درهم‌ریزها ۱۶

۴-۳-۴ محدودیت‌های طول فریم ۱۶

۴-۴ استخراج قیود جبری RSC ۱۶

۴-۴-۱ رابطه recursive ۱۶

۴-۴-۲ قیود parity ۱۶

۴-۴-۳ قیود realizability polynomial ۱۶

۴-۵ آزمون آماری قیود ۱۷

۴-۵-۱ احتمال برقراری constraint ۱۷

۴-۵-۲ احتمال نقض constraint ۱۷

۴-۵-۳ مدل Binomial ۱۷

۴-۵-۴ تعیین آستانه رد ۱۷

۴-۵-۵ کنترل احتمال پذیرش کاذب ۱۷

۴-۶ معماری جست‌وجوی درختی ۱۷

۴-۶-۱ تعریف Node ۱۷

۴-۶-۲ تعریف Depth ۱۷

۴-۶-۳ تعریف Hypothesis ۱۷

۴-۶-۴ Queue Priority ۱۷

۴-۶-۵ Search Best-first ۱۷

۴-۷ فاز اول بازسازی ۱۸
۴-۷-۱ بازسازی U_1 . . . . . ۱۸
۴-۷-۲ بازسازی P_1 . . . . . ۱۸
۴-۷-۳ بازسازی $q(D)$ ۱۸
۴-۷-۴ استخراج $g_0(D)$ ۱۸
۴-۷-۵ استخراج $g_1(D)$ ۱۸
۴-۷-۶ تعیین حافظه m ۱۸
۴-۷-۷ کنترل طول فریم ۱۸
۴-۸ فاز دوم بازسازی ۱۹
۴-۸-۱ بازسازی U_2 . . . . . ۱۹
۴-۸-۲ بازسازی P_2 . . . . . ۱۹
۴-۸-۳ قیود interleaver ۱۹
۴-۸-۴ بازیابی π_i ۱۹
۴-۸-۵ بازیابی π_o ۱۹
۴-۹ راهبردهای Pruning ۱۹
۴-۹-۱ Parity-consistency ۱۹
۴-۹-۲ realizability Polynomial ۱۹
۴-۹-۳ consistency Interleaver ۱۹
۴-۹-۴ constraint Encoder-domain ۱۹
۴-۹-۵ pruning Heuristic ۱۹
۴-۱۰ الگوریتم نهایی ۲۰
۴-۱۱ تحلیل درستی الگوریتم ۲۱
۴-۱۱-۱ شرط لازم ۲۱
۴-۱۱-۲ شرط کافی ۲۱
۴-۱۱-۳ احتمال حذف جواب واقعی ۲۱
۴-۱۱-۴ احتمال پذیرش جواب کاذب ۲۱

۴-۱۱-۵ کامل بودن یا عدم کامل بودن جست‌وجو ۲۱

فصل ۵: تحلیل نظری و پیچیدگی محاسباتی ۲۳

۵-۱ مقدمه ۲۳

۵-۲ پیچیدگی فضای جست‌وجوی کامل ۲۳

۵-۳ پیچیدگی حالت brute-force ۲۳

۵-۴ پیچیدگی جست‌وجوی محدودشده ۲۴

۵-۵ تحلیل Factor Branching ۲۴

۵-۶ اثر قیود بر کاهش فضای جست‌وجو ۲۴

۵-۷ رابطه پیچیدگی با نویز ۲۴

۵-۸ اثر حافظه کدگذار ۲۴

۵-۹ اثر طول interleaver ۲۵

۵-۱۰ تحلیل زمان اجرا ۲۵

۵-۱۱ کران‌های عملی روش ۲۵

فصل ۶: نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد ۲۷

۶-۱ محیط شبیه‌سازی ۲۷

۶-۲ پارامترهای شبیه‌سازی ۲۷

۶-۳ معیارهای ارزیابی ۲۸

۶-۳-۱ Rate Success Reconstruction ۲۸

۶-۳-۲ Rate Reconstruction False ۲۸

۶-۳-۳ solutions admissible of Number ۲۸

۶-۳-۴ distance Structural ۲۸

۶-۳-۵ Runtime ۲۸

۶-۳-۶ nodes expanded of Number ۲۸

۶-۳-۷ nodes pruned of Number ۲۸

۶-۴ اثر P_b / SNR ۲۸

۶-۵ اثر طول interleaver ۲۸
۶-۶ اثر حافظه کدگذار ۲۹
۶-۷ اثر تعداد فریم‌های دریافتی ۲۹
۶-۸ اثر termination ۲۹
۶-۹ اثر نوع interleaver ۲۹
۶-۱۰ اثر hard و observation soft ۲۹
۶-۱۱ تحلیل ambiguity ۲۹
۶-۱۲ مقایسه با روش‌های موجود ۳۰
۶-۱۳ تحلیل آماری Carlo Monte ۳۰
۶-۱۴ بحث نتایج ۳۰

فصل ۷: توسعه روش پیشنهادی و مطالعات تکمیلی ۳۱
۷-۱ مقدمه ۳۱
۷-۲ بازسازی در شرایط عدم همزمانی ۳۱
۷-۳ تخمین طول فریم ناشناخته ۳۱
۷-۴ تخمین نرخ کد ۳۲
۷-۵ بازسازی تحت puncturing ناشناخته ۳۲
۷-۶ بازسازی با information soft ۳۲
۷-۷ بازسازی با تعداد فریم محدود ۳۲
۷-۸ بازسازی در شرایط کانال متغیر ۳۲
۷-۹ استفاده از روش‌های هوشمند برای هدایت جست‌وجو ۳۲
۷-۱۰ مقایسه، Search Beam Best-first و روش‌های دیگر ۳۳
۷-۱۱ امکان استفاده از یادگیری ماشین برای pruning ۳۳

فصل ۸: جمع‌بندی و پیشنهادهای آینده ۳۵
۸-۱ جمع‌بندی تحقیق ۳۵
۸-۲ دستاوردهای اصلی ۳۵

۸-۳ پاسخ به پرسش‌های تحقیق ۳۵
۸-۴ محدودیت‌های روش ۳۶
۸-۵ کاربردهای عملی ۳۶
۸-۶ مسیرهای پژوهشی آینده ۳۶

منابع علمی ۳۷

واژه‌نامهٔ فارسی به انگلیسی ۳۹

واژه‌نامهٔ انگلیسی به فارسی ۴۱

پیوست آ: مطالب تکمیلی نظری ۴۳

پیوست ب: جداول و نتایج تکمیلی ۴۵

پیوست پ: جزئیات الگوریتمی و پیاده‌سازی ۴۷

فهرست شکل‌ها

۱-۱ نمای کلی ساختار موازی کدگذار توربو (نمونه برای الگوبرداری در افزودن شکل‌های بعدی) ۲

فهرست جدول‌ها

۲-۱ دسته‌بندی روش‌های ادبیات در شناسایی/بازسازی کور کد توربو ۱۰

فهرست اختصارات

فصل ۱

کلیات تحقیق

۱-۱ مقدمه

هدف این فصل معرفی مسئله پژوهش، اهمیت و کاربردهای موضوع، و جایگاه رساله در حوزهٔ شناسایی و بازسازی کور[۱] کدهای کانال است[۲]. در این فصل از ورود به جزئیات ریاضی الگوریتم خودداری می‌شود و تمرکز بر تبیین روشن مسئله و انگیزهٔ حل آن قرار دارد.

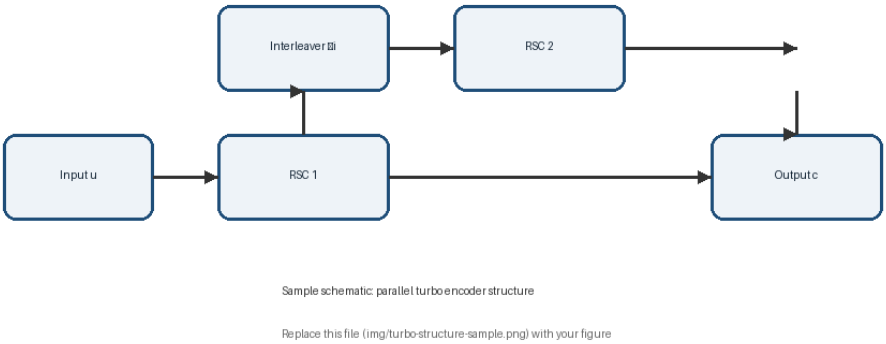
۱-۲ بیان مسئله

مسئلهٔ محوری این رساله، بازسازی کور مشترک ساختار کد توربو شامل پلی‌نوم‌های کدگذارهای RSC، درهم‌ریز داخلی و درهم‌ریز خارجی، با درنظرگرفتن خاتمهٔ ترلیس و نویز کانال در مخابرات غیرهمکارانه است. برخلاف تشخیص صرف نوع کد، هدف بازیابی پارامترهای ساختاری ناشناخته از روی مشاهدات دریافتی است. شکل ۱-۱ نمای کلی از ساختار موازی یک کدگذار توربو را نشان می‌دهد که مؤلفه‌های اصلی مسئلهٔ بازسازی در این رساله را مشخص می‌کند.

---

[۱] بازسازی کور یعنی بازیابی ساختار ناشناختهٔ کد کانال صرفاً از روی مشاهدات دریافتی، بدون دانش قبلی از پارامترهای فرستنده.

[2] Blind reconstruction recovers an unknown channel-code structure from received observations without prior knowledge of the transmitter parameters.



شکل ۱-۱: نمای کلی ساختار موازی کدگذار توربو (نمونه برای الگوبرداری در افزودن شکل‌های بعدی)

۱-۳ اهمیت و ضرورت تحقیق

در سناریوهای غیرهمکارانه، گیرنده معمولاً به مشخصات کامل کدگذاری دسترسی ندارد. بازسازی ساختار کد توربو امکان رمزگشایی، تحلیل ترافیک و توسعهٔ سامانه‌های شنود هوشمند را فراهم می‌کند و از نظر علمی نیز به غنی‌سازی نظریهٔ شناسایی کور کد کانال می‌انجامد.

۱-۴ کاربردهای شناسایی کور کدهای کانال

کاربردهای عملی شامل مخابرات نظامی و اطلاعاتی، پایش طیف، مهندسی معکوس سامانه‌های مخابراتی، و بازیابی اطلاعات در شرایط فقدان مشخصات فرستنده است. کد توربو به‌عنوان یکی از کدهای رایج استاندارد، مورد مطالعاتی مرکزی این رساله است.

۱-۵ چالش‌های شناسایی کور کدهای توربو

فضای جست‌وجوی درهم‌ریزها به‌صورت نمایی بزرگ است، نویز قیود جبری را مخدوش می‌کند، و ابهام ساختاری ممکن است منجر به چندین بازسازی مجاز شود. علاوه بر این، خاتمهٔ ترلیس، پانچینگ و همزمان‌سازی فریم پیچیدگی مسئله را افزایش می‌دهند.

۱-۶ اهداف تحقیق

هدف کلی، ارائهٔ چارچوبی برای شناسایی و بازسازی کور ساختار کد توربو است. اهداف جزئی شامل صورت‌بندی ریاضی پارامترهای مجهول، طراحی الگوریتم بازسازی مشترک، تحلیل پیچیدگی و صحت، و ارزیابی تجربی عملکرد تحت نویز است.

۱-۷ پرسش‌های اصلی تحقیق

۱. چگونه می‌توان پلی‌نوم‌های RSC و درهم‌ریزهای داخلی و خارجی را به‌طور مشترک از مشاهدات نویزی بازسازی کرد؟

۲. نقش خاتمهٔ ترلیس و قیود جبری در کاهش فضای جست‌وجو چیست؟

۳. رابطهٔ سطح نویز با ابهام ساختاری و پیچیدگی محاسباتی چگونه است؟

۱-۸ فرضیات و محدودیت‌های تحقیق

فرضیات پایه شامل مدل کانال AWGN با مدولاسیون BPSK، امکان تبدیل مشاهدهٔ سخت به مدل BSC معادل، و تمرکز بر ساختار موازی کد توربو با خاتمهٔ ترلیس است. محدودیت‌هایی مانند پانچینگ ناشناخته یا عدم همزمانی کامل در فصول توسعه بررسی می‌شوند.

۱-۹ نوآوری‌های تحقیق

۱. صورت‌بندی جامع مسئلهٔ شناسایی و بازسازی کور کدهای توربو؛

۲. بازسازی کور پلی‌نوم‌های RSC بدون دانش قبلی؛

۳. بازسازی همزمان درهم‌ریز داخلی و خارجی؛

۴. لحاظ‌کردن خاتمهٔ ترلیس در بازسازی؛

۵. طراحی جست‌وجوی درختی مقید؛

۶. طراحی معیار آماری برای هرس تحت نویز؛

۷. مدل‌سازی و تحلیل ابهام ساختاری؛

۸. تحلیل رابطهٔ نویز، ابهام و پیچیدگی محاسباتی.

۱-۱۰ روش تحقیق

روش پژوهش ترکیبی از مدل‌سازی ریاضی، استخراج قیود جبری، آزمون آماری قیود، طراحی الگوریتم جست‌وجوی درختی و ارزیابی با شبیه‌سازی مونت‌کارلو است.

۱-۱۱ ساختار رساله

فصل دوم مبانی نظری و پیشینه را مرور می‌کند. فصل سوم مدل سیستم و صورت‌بندی مسئله را ارائه می‌دهد. فصل چهارم روش پیشنهادی را شرح می‌دهد. فصل پنجم به تحلیل نظری و پیچیدگی می‌پردازد. فصل ششم نتایج شبیه‌سازی را گزارش می‌کند. فصل هفتم توسعه‌ها و مطالعات تکمیلی را بررسی می‌کند و فصل هشتم جمع‌بندی و پیشنهادهای آینده را ارائه می‌دهد.

فصل ۲

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا مبانی علمی لازم برای درک کدهای تصحیح خطا و به‌ویژه کدهای توربو مرور می‌شود؛ سپس مفهوم شناسایی کور و پژوهش‌های مرتبط در کدهای کانولوشنی و توربو دسته‌بندی می‌گردد و در پایان شکاف پژوهشی مشخص می‌شود.

۲-۲ کدهای تصحیح خطا

۲-۲-۱ مفهوم کدگذاری کانال

کدگذاری کانال با افزودن افزونگی کنترل‌شده، امکان تشخیص و تصحیح خطا در گیرنده را فراهم می‌کند.

۲-۲-۱-۰-۱ **کدهای بلوکی** در کدهای بلوکی، هر بلوک اطلاعات مستقل رمزگذاری می‌شود و ساختار جبری مشخصی دارد.

۲-۲-۱-۰-۲ **کدهای کانولوشنی** کدهای کانولوشنی با حافظهٔ محدود و نمایش ترلیس، پایهٔ بسیاری از کدگذارهای عملی از جمله RSC هستند.

۲-۲-۱-۰-۳ **کدهای LDPC** کدهای بررسی توازن کم‌چگال با گراف دوقسمتی و رمزگشایی تکراری شناخته می‌شوند.

۲-۲-۱-۰-۴ **کدهای توربو** کدهای توربو با ترکیب موازی یا سریال کدگذارهای کانولوشنی و درهم‌ریز، عملکرد نزدیک به ظرفیت شانون را ممکن می‌سازند.

۲-۳ کدهای توربو

۲-۳-۱ تاریخچه و تکامل کدهای توربو

پیدایش کدهای توربو نقطهٔ عطفی در نظریهٔ کدگذاری بود [۱] و به استانداردهای مخابراتی متعددی راه یافت.

۲-۳-۲ ساختار Code Turbo

ساختار متداول شامل دو کدگذار RSC، درهم‌ریز داخلی، و در برخی سامانه‌ها درهم‌ریز خارجی و پانچینگ است.

۲-۳-۳ کدگذارهای RSC

کدگذارهای سیستماتیک بازگشتی پایهٔ بسیاری از طرح‌های توربو هستند و رفتار ترلیس و قیود پاریتی آن‌ها در بازسازی کور نقش کلیدی دارد.

۲-۳-۴ پلی‌نوم‌های مولد

پلی‌نوم‌های بازخورد و پیش‌خور ساختار کدگذار را تعیین می‌کنند و یکی از اهداف اصلی بازسازی کور هستند.

۲-۳-۵ حافظه و حالت‌های کدگذار

حافظهٔ کدگذار تعداد بیت‌های رجیستر و تعداد حالت‌های ترلیس را مشخص می‌کند.

۲-۳-۶ ترلیس و گذارهای حالت

نمایش ترلیس گذارهای مجاز حالت را توصیف می‌کند و مبنای رمزگشایی و استخراج قیود است.

۲-۳-۷ خاتمه ترلیس

بیت‌های خاتمه، ترلیس را به حالت مشخصی می‌برند و طول فریم خروجی را تحت تأثیر قرار می‌دهند؛ در مدل این رساله رابطهٔ طول با خاتمه لحاظ می‌شود.

۲-۳-۸ درهم‌ریز داخلی

درهم‌ریز داخلی ترتیب بیت‌های ورودی کدگذار دوم را تغییر می‌دهد و بازیابی آن از مسائل دشوار بازسازی است.

۲-۳-۹ درهم‌ریز خارجی

درهم‌ریز خارجی بر چینش سریالی خروجی اثر می‌گذارد و باید همراه با سایر پارامترها بازسازی شود.

۲-۳-۱۰ پانچینگ و نرخ کد

پانچینگ با حذف گزینشی بیت‌های پاریتی نرخ کد را افزایش می‌دهد و شناسایی آن را دشوارتر می‌کند.

۲-۳-۱۱ ساختار سریالی خروجی کد توربو

چینش بیت‌های سیستماتیک و پاریتی در جریان خروجی، مدل مشاهدهٔ گیرنده را شکل می‌دهد.

۲-۴ مدل کانال و مدل مشاهده

۲-۴-۱ کانال AWGN

مدل نویز سفید گاوسی جمع‌شونده فرض پایهٔ بسیاری از ارزیابی‌ها است.

۲-۴-۲ BPSK

مدولاسیون دودویی فاز، نگاشت بیت به نماد را ساده می‌کند و با مدل‌های تحلیلی سازگار است.

۲-۴-۳ آشکارسازی سخت

در آشکارسازی سخت، هر نماد به یک بیت قطعی نگاشت می‌شود و مشاهده به دنبالهٔ باینری تبدیل می‌گردد.

۲-۴-۴ آشکارسازی نرم

اطلاعات نرم (مانند LLR) می‌تواند دقت بازسازی را بهبود دهد و در فصل توسعه بررسی می‌شود.

۲-۴-۵ مدل کانال معادل BSC

پس از آشکارسازی سخت، کانال معادل BSC با احتمال خطای بیت مشخص، مدل مشاهدهٔ عملیاتی رساله را تشکیل می‌دهد.

۲-۵ مفهوم شناسایی کور

در ادبیات، تمایز میان طبقه‌بندی کور، تخمین کور و بازسازی کور[1] اهمیت دارد. طبقه‌بندی نوع کد را مشخص می‌کند، تخمین برخی پارامترها را به‌دست می‌آورد، و بازسازی ساختار کامل (یا مجموعهٔ ساختارهای مجاز) را

[1] Blind Reconstruction

هدف قرار می‌دهد؛ تمرکز این رساله بر بازسازی است. کدهای کد توربو[2] و کدگذارهای RSC نمونهٔ مرکزی این مطالعه هستند.

۲-۶ شناسایی کور کدهای کانولوشنی

روش‌های مبتنی بر رتبه، قیود دوگان، و الگوریتم‌های تکراری برای بازیابی پارامترهای کد کانولوشنی مرور می‌شوند تا زمینه‌ای برای تعمیم به توربو فراهم گردد.

۲-۷ شناسایی کور کدهای توربو

۲-۷-۱ شناسایی پارامترهای کدگذار

۲-۷-۲ بازیابی پلی‌نوم‌ها

۲-۷-۳ بازیابی درهم‌ریز

۲-۷-۴ تشخیص نرخ کد

۲-۷-۵ تشخیص طول فریم

۲-۷-۶ تشخیص حافظه

۲-۷-۷ تشخیص پانچینگ

۲-۷-۸ همزمان‌سازی و تعیین مرز فریم

در این زیربخش‌ها پژوهش‌های مرتبط با هر پارامتر دسته‌بندی و نقاط قوت و ضعف آن‌ها بیان می‌شود.

[2] Turbo Code

۲-۸ روش‌های موجود در ادبیات

به‌جای فهرست خطی مقالات، روش‌ها در دسته‌هایی مانند شناسایی کدگذار، بازیابی درهم‌ریز، dual-code، BCJR، rank-based، ML/EM و reconstruction joint طبقه‌بندی می‌شوند. جدول ۲-۱ نمای کلی این دسته‌بندی را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۱: دسته‌بندی روش‌های ادبیات در شناسایی/بازسازی کور کد توربو

دسته	پارامتر بازیابی‌شده متداول
شناسایی کدگذار	پلی‌نوم‌ها، حافظه
بازیابی درهم‌ریز	جایگزشت
dual-code	قیود پاریتی
مبتنی بر BCJR	ساختار و درهم‌ریز
rank-based	طول، بعد، ساختار
ML/EM	تخمین پارامتر
بازسازی مشترک	چند مؤلفهٔ همزمان

۲-۹ شکاف پژوهشی

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، بازسازی همزمان ساختار کامل یک کد توربو شامل پارامترهای کدگذار، درهم‌ریز داخلی و درهم‌ریز خارجی، در شرایط مشاهدهٔ ناقص و نویزی، همچنان مسئله‌ای دشوار و تا حد زیادی حل‌نشده است. این رساله همین خلأ را هدف قرار می‌دهد.

فصل ۳

مدل سیستم و صورت‌بندی ریاضی مسئله

۳-۱ مقدمه

فصل قبل مبانی و پیشینه را مرور کرد؛ در این فصل مسئلهٔ تحقیق به‌صورت دقیق مدل‌سازی و پارامترهای مجهول تعریف می‌شوند.

۳-۲ ساختار عمومی کد توربو

ساختار موازی متداول شامل دو کدگذار RSC، درهم‌ریز داخلی، و در صورت وجود درهم‌ریز خارجی و الگوی پانچینگ توصیف می‌شود.

۳-۳ مدل کدگذار RSC

۳-۳-۱ مدل چندجمله‌ای

۳-۳-۲ تابع انتقال

۳-۳-۳ نمایش باینری و اکتال

۳-۳-۴ معادلات بازگشتی

روابط بازگشتی میان بیت سیستماتیک و پاریتی، قیود جبری لازم برای بازسازی را فراهم می‌کنند.

۳-۴ مدل درهم‌ریز داخلی

درهم‌ریز داخلی به‌صورت جایگزشت روی بلوک اطلاعات مدل می‌شود و فضای حالت آن در حالت کلی بسیار بزرگ است.

۳-۵ مدل درهم‌ریز خارجی

درهم‌ریز خارجی چینش بیت‌های خروجی را تعیین می‌کند و باید در مجموعهٔ پارامترهای مجهول لحاظ شود.

۳-۶ مدل پانچینگ

الگوی پانچینگ نرخ مؤثر کد را تغییر می‌دهد؛ در مدل پایه ممکن است معلوم فرض شود و در فصل توسعه به‌صورت ناشناخته بررسی گردد.

۳-۷ مدل خاتمه ترلیس

با درنظرگرفتن بیت‌های خاتمه، طول فریم پیش از درهم‌ریز خارجی می‌تواند از رابطه‌ای مانند

$$N = ۳L + ۴m \tag{۳-۱}$$

به‌دست آید که در آن L طول بلوک اطلاعات و m حافظهٔ کدگذار است.

۳-۸ مدل کانال

۳-۸-۱ AWGN

۳-۸-۲ BPSK

۳-۸-۳ BSC معادل

پس از آشکارسازی سخت، مشاهده به‌صورت دنباله‌های باینری نویزی در مدل BSC توصیف می‌شود.

۳-۹ مدل دریافت

فرض‌های مشاهده شامل مشخص‌بودن یا نبودن مرز فریم، نوع آشکارسازی سخت/نرم، تعداد فریم‌های دریافتی F، نرخ خطای کانال، و ناشناخته‌بودن ساختار کد است.

۳-۱۰ تعریف پارامترهای مجهول

مجموعهٔ پارامترهای مجهول به‌صورت

$$\theta = \{m, g_0(D), g_1(D), \pi_i, \pi_o, L\} \tag{۳-۲}$$

تعریف می‌شود که شامل حافظه، پلی‌نوم‌های مولد، درهم‌ریزهای داخلی و خارجی، و طول بلوک است.

۳-۱۱ تعریف مسئله بازسازی کور

با دریافت مشاهدات R، هدف تخمین مجموعهٔ مقادیر مجاز θ است. خروجی الگوریتم لزوماً یک پاسخ یکتا نیست و ممکن است مجموعه‌ای از بازسازی‌های ساختاریاً معادل (ابهام ساختاری) به‌دست آید.

فصل ۴

روش پیشنهادی بازسازی کور مشترک

۴-۱ مقدمه

این فصل قلب رساله است و معماری الگوریتم بازسازی کور مشترک کد توربو را از ایدهٔ اصلی تا تحلیل درستی شرح می‌دهد.

۴-۲ ایده اصلی روش پیشنهادی

ایدهٔ محوری، ترکیب قیود جبری RSC با آزمون آماری تحت نویز و جست‌وجوی درختی مقید است تا فضای جایگزشت‌ها و پلی‌نوم‌ها به‌صورت تدریجی هرس شود.

۴-۳ تعریف فضای جست‌وجو

۴-۳-۱ فضای پلی‌نوم‌ها

۴-۳-۲ فضای حافظه

۴-۳-۳ فضای درهم‌ریزها

۴-۳-۴ محدودیت‌های طول فریم

فضای خام درهم‌ریز از مرتبهٔ $N!$ است و جست‌وجوی کامل عملاً ناممکن است؛ بنابراین کاهش فضا با قیود ضروری است.

۴-۴ استخراج قیود جبری RSC

۴-۴-۱ رابطه recursive

۴-۴-۲ قیود parity

۴-۴-۳ قیود realizability polynomial

این قیود نامزدهای ناسازگار را در مراحل اولیه حذف می‌کنند.

۴-۵ آزمون آماری قیود

۴-۵-۱ احتمال برقراری constraint

۴-۵-۲ احتمال نقض constraint

۴-۵-۳ مدل Binomial

۴-۵-۴ تعیین آستانه رد

۴-۵-۵ کنترل احتمال پذیرش کاذب

تحت نویز، برقراری دقیق قیود تضمین نمی‌شود؛ بنابراین آزمون آماری مبتنی بر مدل دوجمله‌ای برای پذیرش یا رد فرضیه‌ها به کار می‌رود.

۴-۶ معماری جست‌وجوی درختی

۴-۶-۱ تعریف Node

۴-۶-۲ تعریف Depth

۴-۶-۳ تعریف Hypothesis

۴-۶-۴ Queue Priority

۴-۶-۵ Search Best-first

جست‌وجوی بهترین‌اول با صف اولویت، بسط فرضیه‌های امیدوارکننده‌تر را در اولویت قرار می‌دهد.

۴-۷ فاز اول بازسازی

۴-۷-۱ بازسازی U_1

۴-۷-۲ بازسازی P_1

۴-۷-۳ بازسازی $q(D)$

۴-۷-۴ استخراج $g_0(D)$

۴-۷-۵ استخراج $g_1(D)$

۴-۷-۶ تعیین حافظه m

۴-۷-۷ کنترل طول فریم

فاز اول عمدتاً مؤلفه‌های مرتبط با کدگذار اول و طول سازگار را بازیابی می‌کند.

۴-۸ فاز دوم بازسازی

۴-۸-۱ بازسازی $U_۲$

۴-۸-۲ بازسازی $P_۲$

۴-۸-۳ قیود interleaver

۴-۸-۴ بازیابی π_i

۴-۸-۵ بازیابی π_o

فاز دوم با اتکا به نتایج فاز اول، دنباله‌ها و درهم‌ریزهای داخلی و خارجی را بازسازی می‌کند.

۴-۹ راهبردهای Pruning

۴-۹-۱ Parity-consistency

۴-۹-۲ Polynomial realizability

۴-۹-۳ Interleaver consistency

۴-۹-۴ Encoder-domain constraint

۴-۹-۵ Heuristic pruning

هرس چندلایه مانع انفجار شاخه‌ها می‌شود و باید احتمال حذف پاسخ واقعی را کنترل کند.

۴-۱۰ الگوریتم نهایی

در این بخش شبه‌کد کامل الگوریتم دوفازی همراه با ورودی/خروجی و معیار توقف ارائه می‌شود.

الگوریتم ۴-۱ اسکلت الگوریتم بازسازی کور مشترک کد توربو

ورودی: مشاهدات R، محدودهٔ جست‌وجوی m و طول، آستانه‌های آماری
خروجی: مجموعهٔ پاسخ‌های مجاز $\widehat{\Theta}$

```
مقداردهی صف اولویت با فرضیه‌های اولیهٔ فاز اول
تا زمانی که صف خالی نیست انجام بده
    انتخاب بهترین فرضیه
    آزمون قیود جبری و آماری
    اگر فرضیه رد شود آنگاه
        هرس و ادامه
    پایان شرط اگر
    بسط فرزندان و به‌روزرسانی صف
پایان حلقهٔ تا زمانی که
اجرای فاز دوم برای نامزدهای باقی‌مانده و تشکیل Θ̂
بازگردان Θ̂
```

۴-۱۱ تحلیل درستی الگوریتم

۴-۱۱-۱ شرط لازم

۴-۱۱-۲ شرط کافی

۴-۱۱-۳ احتمال حذف جواب واقعی

۴-۱۱-۴ احتمال پذیرش جواب کاذب

۴-۱۱-۵ کامل بودن یا عدم کامل بودن جست‌وجو

در این بخش، خواص نظری الگوریتم نسبت به مقالهٔ پایه گسترش می‌یابد تا برای سطح رسالهٔ دکتری کفایت استدلالی داشته باشد.

فصل ۵

تحلیل نظری و پیچیدگی محاسباتی

۵-۱ مقدمه

این فصل پیچیدگی فضای جست‌وجو، اثر قیود و نویز بر هزینهٔ محاسباتی، و کران‌های عملی روش پیشنهادی را به‌صورت مستقل از ارزیابی شبیه‌سازی تحلیل می‌کند.

۵-۲ پیچیدگی فضای جست‌وجوی کامل

ابعاد فضای کامل شامل ترکیب فضای پلی‌نوم، حافظه و جایگزشت‌ها توصیف می‌شود.

۵-۳ پیچیدگی حالت brute-force

جست‌وجوی کامل درهم‌ریز از مرتبهٔ فاکتوریل است و عملاً غیرقابل اجراست؛ این بخش کران پایین محاسباتی را روشن می‌کند.

۵-۴ پیچیدگی جست‌وجوی محدودشده

با اعمال قیود جبری و آماری، فضای مؤثر به‌صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد؛ مدل پیچیدگی الگوریتم مقید در اینجا ارائه می‌شود.

۵-۵ تحلیل Factor Branching

ضریب انشعاب درخت جست‌وجو در اعماق مختلف و وابستگی آن به نوع قیود بررسی می‌شود.

۵-۶ اثر قیود بر کاهش فضای جست‌وجو

هر قید (پاریتی، تحقق‌پذیری پلی‌نوم، سازگاری درهم‌ریز) سهم جداگانه‌ای در هرس دارد که باید کمی‌سازی شود.

۵-۷ رابطه پیچیدگی با نویز

با افزایش نویز، تعداد فرضیه‌هایی که از هرس عبور می‌کنند افزایش می‌یابد و رفتار جست‌وجو به سمت رشد نمایی میل می‌کند؛ این پدیده از یافته‌های مهم تحلیل است.

۵-۸ اثر حافظه کدگذار

افزایش m هم فضای پلی‌نوم و هم طول خاتمه را بزرگ‌تر می‌کند و هزینه را بالا می‌برد.

۵-۹ اثر طول interleaver

طول بزرگ‌تر جایگزشت، فضای نامزدها و زمان بسط گره‌ها را افزایش می‌دهد.

۵-۱۰ تحلیل زمان اجرا

مدل زمان اجرا برحسب تعداد گره‌های بسط‌یافته، آزمون‌های آماری و عملیات هرس ارائه می‌شود.

۵-۱۱ کران‌های عملی روش

شرایطی که در آن روش از نظر زمان و حافظه عملی باقی می‌ماند، همراه با رژیم‌های ناکارآمد، جمع‌بندی می‌گردد.

فصل ۶

نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد

۶-۱ محیط شبیه‌سازی

بسته‌های نرم‌افزاری، سخت‌افزار اجرا، و چارچوب تولید داده و نویز در این بخش توصیف می‌شوند.

۶-۲ پارامترهای شبیه‌سازی

پارامترهای پایه شامل حافظهٔ m، طول L، تعداد فریم F، احتمال خطای بیت P_b، نوع درهم‌ریز، نوع کد، خاتمه، پانچینگ و نوع مشاهدهٔ سخت/نرم است. نمونه‌های موردی مانند کدهای (۱۵, ۱۳)، (۱۷, ۱۵) و (۱۷۱, ۱۳۳) و طول‌های $L \in \{۵۰, ۱۰۰, ۳۰۰, ۵۰۰\}$ در ارزیابی لحاظ می‌شوند.

۶-۳ معیارهای ارزیابی

۶-۳-۱ Rate Success Reconstruction

۶-۳-۲ Rate Reconstruction False

۶-۳-۳ solutions admissible of Number

۶-۳-۴ distance Structural

۶-۳-۵ Runtime

۶-۳-۶ nodes expanded of Number

۶-۳-۷ nodes pruned of Number

این معیارها فراتر از دقت صرف، جنبهٔ ابهام و هزینهٔ محاسباتی را نیز پوشش می‌دهند.

۶-۴ اثر SNR / P_b

منحنی‌های موفقیت و پیچیدگی برحسب سطح نویز گزارش می‌شوند.

۶-۵ اثر طول interleaver

تأثیر طول جایگزشت بر نرخ موفقیت و زمان اجرا بررسی می‌شود.

۶-۶ اثر حافظه کدگذار

عملکرد برای مقادیر مختلف m مقایسه می‌گردد.

۶-۷ اثر تعداد فریم‌های دریافتی

افزایش F معمولاً آمار قیود را پایدارتر می‌کند؛ این بخش حساسیت را می‌سنجد.

۶-۸ اثر termination

نقش مدل خاتمه در صحت طول فریم و بازسازی ساختار تحلیل می‌شود.

۶-۹ اثر نوع interleaver

درهم‌ریزهای تصادفی و ساخت‌یافته از نظر دشواری بازیابی مقایسه می‌شوند.

۶-۱۰ اثر hard و observation soft

تفاوت مشاهدهٔ سخت و نرم در دقت و هزینه بررسی می‌شود.

۶-۱۱ تحلیل ambiguity

حتی در حالت بدون نویز ممکن است چند بازسازی معادل وجود داشته باشد؛ این بخش توزیع تعداد جواب‌های مجاز را تحلیل می‌کند.

۶-۱۲ مقایسه با روش‌های موجود

مقایسه در چهار محور انجام می‌شود: گسترهٔ بازسازی، دانش پیشین موردنیاز، مقاومت به نویز، و پیچیدگی محاسباتی.

۶-۱۳ تحلیل آماری Carlo Monte

تنظیمات تکرار مونت‌کارلو، فاصلهٔ اطمینان و آزمون‌های آماری مرتبط گزارش می‌شوند.

۶-۱۴ بحث نتایج

یافته‌های کلیدی، محدودیت‌های مشاهده‌شده و دلالت‌های آن‌ها برای طراحی الگوریتم جمع‌بندی می‌گردند.

فصل ۷

توسعه روش پیشنهادی و مطالعات تکمیلی

۷-۱ مقدمه

این فصل رساله را از یک مقالهٔ گسترش‌یافته فراتر می‌برد و تعمیم‌ها و مطالعات تکمیلی حول هستهٔ بازسازی کور مشترک را معرفی می‌کند.

۷-۲ بازسازی در شرایط عدم همزمانی

حالتی بررسی می‌شود که مرز دقیق نماد یا فریم در دسترس نباشد و همزمان‌سازی جزئی از مسئلهٔ بازسازی گردد.

۷-۳ تخمین طول فریم ناشناخته

وقتی L یا N از پیش معلوم نیست، راهبردهای تخمین طول و اتصال آن به جست‌وجوی ساختاری مطرح می‌شود.

۷-۴ تخمین نرخ کد

شناسایی نرخ مؤثر و ارتباط آن با الگوی افزونگی/پانچینگ بررسی می‌گردد.

۷-۵ بازسازی تحت puncturing ناشناخته

الگوی پانچینگ به مجموعهٔ پارامترهای مجهول افزوده می‌شود و اثر آن بر قیود و پیچیدگی تحلیل می‌شود.

۷-۶ بازسازی با information soft

استفاده از اطلاعات نرم برای بهبود آزمون قیود و کاهش پذیرش کاذب مطالعه می‌شود.

۷-۷ بازسازی با تعداد فریم محدود

عملکرد روش در رژیم دادهٔ کم و راهبردهای پایدارسازی آمار قیود بررسی می‌گردد.

۷-۸ بازسازی در شرایط کانال متغیر

کانال ناایستا یا تغییر آهستهٔ SNR چالش‌هایی برای آستانه‌های ثابت ایجاد می‌کند که در اینجا تحلیل می‌شود.

۷-۹ استفاده از روش‌های هوشمند برای هدایت جست‌وجو

رهیافت‌های مکاشفه‌ای برای اولویت‌بندی فرضیه‌ها و کاهش بسط غیرضروری معرفی می‌شوند.

۷-۱۰ مقایسه Search Beam Best-first، و روش‌های دیگر

راهبردهای جایگزین پیمایش درخت از نظر دقت، حافظه و زمان مقایسه می‌گردند.

۷-۱۱ امکان استفاده از یادگیری ماشین برای pruning

امکان جایگزینی یا تکمیل قواعد هرس کلاسیک با مدل‌های یادگیری برای پیش‌بینی نامزدهای امیدوارکننده بررسی می‌شود.

فصل ۸

جمع‌بندی و پیشنهادهای آینده

۸-۱ جمع‌بندی تحقیق

این رساله مسئلهٔ شناسایی و بازسازی کور ساختار کدهای توربو در مخابرات غیرهمکارانه را صورت‌بندی کرد و روشی برای بازسازی مشترک پلی‌نوم‌های RSC و درهم‌ریزهای داخلی و خارجی با لحاظ خاتمهٔ ترلیس و نویز ارائه داد.

۸-۲ دستاوردهای اصلی

دستاوردها شامل چارچوب ریاضی پارامترهای مجهول، الگوریتم جست‌وجوی درختی مقید دوفازی، معیارهای آماری هرس، تحلیل ابهام ساختاری، و ارزیابی نظری/تجربی پیچیدگی و عملکرد است.

۸-۳ پاسخ به پرسش‌های تحقیق

در این بخش، پاسخ‌های مستند به پرسش‌های مطرح‌شده در فصل اول بر اساس نتایج فصول چهارم تا ششم جمع‌بندی می‌شود.

۸-۴ محدودیت‌های روش

محدودیت‌هایی مانند حساسیت به نویز بالا، هزینهٔ محاسباتی در طول‌های بزرگ، وابستگی به فرضیات مدل مشاهده، و ابهام ساختاری باقی‌مانده بیان می‌گردد.

۸-۵ کاربردهای عملی

دلالت‌های روش برای سامانه‌های غیرهمکارانه، پایش طیف و مهندسی معکوس کد کانال مرور می‌شود.

۸-۶ مسیرهای پژوهشی آینده

پیشنهادهای آینده شامل تعمیم به کدهای مرتبط، بازسازی برخط، بهره‌گیری قوی‌تر از اطلاعات نرم، یادگیری برای هرس، و ارزیابی روی داده‌های واقعی میدان است.

منابع علمی

[1] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, “Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes,” *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, vol.2, pp.1064–1070, 1993.

واژه‌نامهٔ فارسی به انگلیسی

ب

بازسازی کور . . . . . Blind Reconstruction

ک

کد توربو . . . . . Turbo Code

واژه‌نامهٔ انگلیسی به فارسی

B

Blind Reconstruction . . . . . بازسازی کور

T

Turbo Code . . . . . کد توربو

پیوست آ

مطالب تکمیلی نظری

این پیوست برای اثبات‌های تکمیلی، مشتق‌گیری‌های طولانی و جزئیات نظری‌ای در نظر گرفته شده است که برای روانی متن اصلی در فصول سوم تا پنجم گنجانده نشده‌اند.

پیوست ب

جداول و نتایج تکمیلی

این پیوست برای جداول پارامتر، نمودارهای تکمیلی مونت‌کارلو و نتایجی است که به‌دلیل حجم در فصل ششم نیامده‌اند.

پیوست پ

جزئیات الگوریتمی و پیاده‌سازی

این پیوست برای شبه‌کدهای تفصیلی، ساختار داده‌ها، تنظیمات پیاده‌سازی و نکات تکرارپذیری الگوریتم فصل چهارم اختصاص دارد.

Abstract

Blind identification and reconstruction of channel code structure, particularly turbo codes, is a central problem in non-cooperative communications. This dissertation formulates and addresses the joint reconstruction of RSC generator polynomials together with the inner and outer interleavers, while accounting for trellis termination and channel noise. The proposed approach combines algebraic encoder constraints, statistical constraint testing under noise, and a constrained tree search to recover the unknown parameter set from hard (and, in extensions, soft) observations. The main contributions include a comprehensive problem formulation, simultaneous reconstruction of turbo-code components, modeling of structural ambiguity, and analysis of the relationship between noise, ambiguity, and computational complexity. Simulation results and theoretical analyses indicate that the method can recover admissible code structures under noisy conditions; final quantitative findings will be reported after completing the experimental evaluation.

1-0-0-0- Keywords Blind reconstruction, Turbo code, RSC encoder, Interleaver, Non-cooperative communications, Blind channel code identification

University of Tehran
College of Interdisciplinary Sciences and Technologies
Faculty of Interdisciplinary Sciences and Technologies
Department of ??

Joint Blind Reconstruction of Turbo Codes with Simultaneous Recovery of RSC Encoders and Inner/Outer Interleavers

A Thesis submitted to the Graduate Studies Office
In partial fulfillment of the requirements for
The degree of Doctor of Philosophy
in ?? - ??

By:
Shahryar Toughi

Supervisor:
Mehdi Teimouri

Advisor:
First Advisor

Month Year